

DOCTORAT D'ETAT

N.° d'enregistrement

au C.N.R.S.

A.O. 4298

ARTICLE PRINCIPAL

Recouvrant en partie la Thèse

présentée

A LA FACULTE DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITE DE PARIS

pour obtenir le grade de

DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

par

A DUPIS

Sujet de la Thèse : Premières applications de la magnéto-tellurique à la prospection
pétrolière, géologique ou minière de diverses régions métropolitaines

Soutenue le 8 Mai 1970 devant la Commission d'examen

L. CAGNIARD

Président

J. DELLOUE

J. GOGUEL

L. MIGAUX

} Examinateurs

Invité

DOCTORAT D'ETAT

N.° d'enregistrement
au C.N.R.S.

A.O. 4298

ARTICLE PRINCIPAL

Recouvrant en partie la Thèse

présentée

A LA FACULTE DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITE DE PARIS

pour obtenir le grade de

DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

par

A DUPIS

Sujet de la Thèse : Premières applications de la magnéto-tellurique à la prospection
pétrolière, géologique ou minière de diverses régions métropolitaines

Soutenue le Mai 1970 devant la Commission d'examen

L. CAGNIARD

Président

J. DELLOUE

J. GOGUEL

L. MIGAUX

} Examineurs

Invité



LE SONDAGE MAGNÉTO-TELLURIQUE SON APPLICATION A UNE PROSPECTION DE GRANDE RECONNAISSANCE

A. DUPIS

Centre de Recherches Géophysiques du C. N. R. S.

Extrait de la
REVUE DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE
ET ANNALES DES COMBUSTIBLES LIQUIDES

Vol. XXIV, n° 11, novembre 1969

LE SONDAGE MAGNÉTO-TELLURIQUE SON APPLICATION A UNE PROSPECTION DE GRANDE RECONNAISSANCE

A. DUPIS

Centre de Recherches Géophysiques du C. N. R. S.

A la suite d'un article précédent (Benderitter, 1968) qui rappelle le principe de la méthode magnéto-tellurique et décrit la réalisation d'un appareillage adéquat, on envisage l'application pratique de la méthode. Le travail de terrain nécessaire à l'exécution d'un sondage est d'abord brièvement exposé avant d'aborder quelques aspects des problèmes posés par l'interprétation. On présente enfin quelques résultats d'une campagne de grande reconnaissance en géophysique pétrolière.

As a follow-up to a previous article (Benderitter, 1968) reviewing the magneto-telluric method and describing the construction of a suitable apparatus, the practical application of the method is considered. The field work required for a sounding operation is first described briefly before going on to various aspects of the problems raised by interpretation. Then some results are given of a large-scale petroleum-geophysics campaign.

Continuando un artículo precedente (Benderitter, 1968) que recuerda el principio del método magnético-telúrico y describe la realización de un aparato adecuado, se encara la aplicación práctica del método. El trabajo de terreno necesario para la ejecución de un sondeo se expone primeramente antes de abordar algunos aspectos de los problemas que se presentan para la interpretación. Por fin, se presentan algunos resultados de una campaña de gran reconocimiento en geofísica petrolera.

Si la méthode magnéto-tellurique (M. T.) à l'instar des méthodes électriques d'injection est susceptible de nombreuses variantes dans ses applications, il n'en reste pas moins que le sondage en est aussi l'expression la plus complète. Ce sondage M. T. présente d'ailleurs certaines analogies avec le sondage électrique bien connu (sondage E). Dans un cas comme dans l'autre, on étudie les variations de résistivité des terrains en fonction de la profondeur.

Les principes sur lesquels reposent les deux méthodes demeurent cependant essentiellement différents. La M. T. étudie un phénomène électromagnétique naturel alors que le sondage E consiste à injecter un courant électrique artificiel, habituellement continu. On sait que le sondage M. T. se contente de lignes telluriques courtes (100 à 300 m) alors que le sondage E exige le déploiement de plusieurs kilomètres de fils lorsqu'il s'agit de prospecter un bassin sédimentaire d'une profondeur moyenne. Cette remarque n'a pas seulement une incidence d'ordre pratique, mais aussi d'ordre théorique, car il est évident qu'avec de grandes lignes d'injection l'intégration fatale des structures nuira à la finesse des résultats.

L'interprétation relève, en grande partie, des mêmes techniques pour les deux types de sondage ; on mettra cependant en évidence la facilité des calculs et une meilleure résolution des cas complexes à l'actif de la méthode M. T.

L'exposé partiel des résultats, acquis lors d'une prospection de grande reconnaissance, permettra de saisir l'intérêt des renseignements fournis par la méthode malgré la complexité presque exceptionnelle des conditions structurales rencontrées.

I. LE SONDAGE M. T.

1. Travail de terrain.

Le spectre actuellement étudié s'étend de 0,01 à 900 s, il n'est cependant pas utile de l'analyser complètement dans tous les cas. Une connaissance sommaire de la région à prospecter suffit généralement à limiter la gamme des périodes à retenir. Il existe même une technique reposant sur l'analyse d'une seule période par station, c'est le profilage M. T., cher à nos collègues soviétiques, mais il ne doit être employé qu'en certains cas bien précis, avec de grandes précautions.

La conception d'une mission de terrain va dépendre en partie de la nature des problèmes posés. On peut prospecter un bassin sédimentaire, ou des terrains cristallins, pour une large reconnaissance ou pour une étude détaillée, on doit aussi prendre en considération la profondeur des structures recherchées.

Des quatre gammes définies dans l'article précédent (BENDERITTER, 1968), à savoir : 0,01 s-0,25 s ; 0,25 s-4 s ; 4 s-60 s ; 60 s-900 s, on n'étudie le plus souvent que les trois premières. La quatrième n'est qu'exceptionnellement retenue si le bassin prospecté est comblé sur de grandes épaisseurs par des sédiments très conducteurs (argiles, marnes) ; dans ce cas, la durée des enregistrements dépasse 24 h. On a toutefois la possibilité de ne l'utiliser que partiellement, jusqu'à 200 s par exemple, de façon à ne pas allonger inutilement la durée de stationnement.

On effectue habituellement un sondage par jour ; c'est la véritable vocation de l'équipement actuel. Néanmoins, dans le cas de structures peu profondes, on a pu faire trois mesures quotidiennes. Cette cadence pourra encore être doublée, grâce à quelques modifications en cours (alimentation des appareils par batteries, élimination des parasites, analyse).

A la station, le travail reste, à peu de chose près, le même dans tous les cas, c'est le temps d'enregistrement qui diffère le plus selon le type de la prospection. Le plus souvent il est pratiqué un sondage croisé (avec l'étude de E_x/H_y et de E_y/H_x) dont on verra l'utilité par la suite. La figure 1 présente la disposition des appareils sur le terrain.

L'entrée différentielle et symétrique de la chaîne d'amplification exige la pose de cinq électrodes pour les deux lignes telluriques. Il faut en effet une prise de terre de référence qui sert d'ailleurs en même temps de mise à la terre du groupe électrogène d'alimentation des appareils. Les capteurs magnétiques sont disposés à une centaine de mètres du camion-laboratoire et du groupe pour éviter les perturbations magnétiques qu'ils engendrent.

Le travail de topographie (alignement des capteurs, écartement des électrodes, nivellement de l'emplacement des magnétomètres) est effectué à l'avance par deux des opérateurs. Habituellement les enregistrements débutent par la gamme la plus lente. C'est ce temps (environ 4 h) qu'on met utilement à profit pour préparer la station suivante. Les signaux sont inscrits sur bande magnétique et leur lecture immédiate sur inscripteur graphique permet le contrôle du bon fonctionnement de tout le système d'acquisition de données. On évite ainsi le risque de constater trop tard, lors du play-back, un défaut qui pourrait exiger le retour sur le terrain. Pour la gamme 0,25 s-4 s la durée est réduite à 30 mn environ et, bien qu'on analyse directement les fréquences de la gamme 0,25 s-0,01 s, on procède également à leur enregistrement magnétique de façon à conserver aussi les phénomènes de cette gamme.

Les opérations ci-dessus décrites durent environ 6 h ; il reste à relire les bandes magnétiques à

CAMION LABORATOIRE

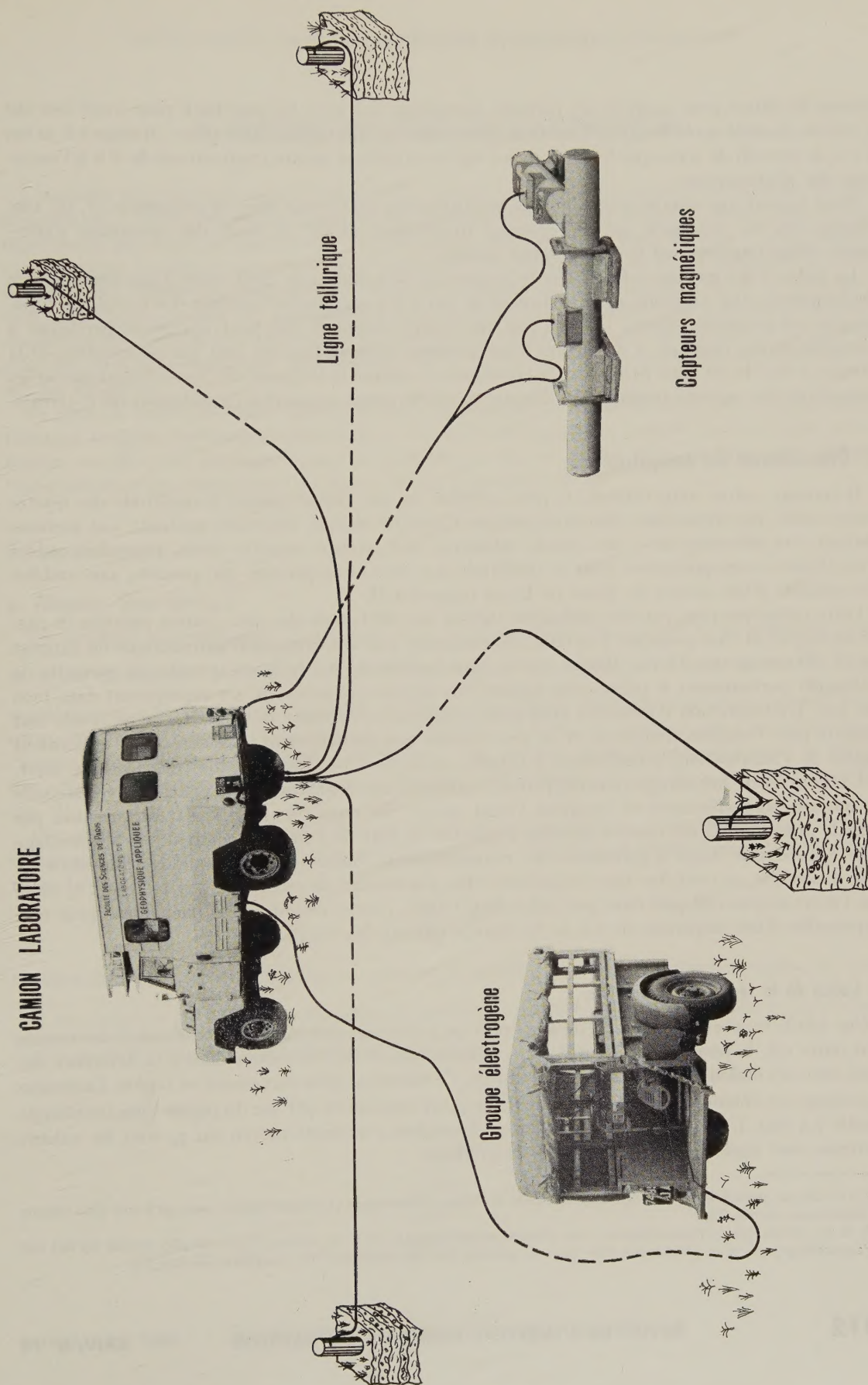


FIG. 1. — Dispositif d'enregistrement magnéto-tellurique sur le terrain.

travers les filtres pour analyser les périodes supérieures à 0,25 s. Ce play-back peut avoir lieu sur le terrain aussitôt après les opérations d'enregistrement ou plus tard au laboratoire ; il exige 1 h 30 mn à 2 h de travail, de sorte que le temps passé sur le terrain est approximativement de 8 h à l'exclusion des déplacements.

Il est à noter que sans les possibilités de multiplication de vitesses donc de fréquences (1, 10, 100) offertes lors du play-back par l'enregistreur magnétique utilisé, la durée des opérations s'effectuant obligatoirement sur le terrain serait doublée.

La cadence des mesures est plus élevée lorsque l'on se contente de deux, voire d'une seule gamme de fréquences. On stationne alors seulement 30 mn à 1 h sur chaque sondage. Le travail de topographie est avantageusement effectué par une équipe différente qui peut également participer à l'installation des capteurs et des câbles si les distances entre stations ne sont pas prohibitives. Si la gamme 4-100 Hz est seule nécessaire, la possibilité de réduire la longueur des lignes telluriques et les dimensions des capteurs magnétiques diminue encore le temps consacré à l'installation sur le terrain.

2. Dépouillement des enregistrements.

Il consiste encore actuellement, le plus souvent, en une simple mesure d'amplitude des quatre composantes du phénomène électromagnétique naturel à chaque fréquence analysée. Ces mesures doivent être effectuées avec une grande attention, une certaine minutie même, pour des couples d'oscillations correspondantes dont la similitude doit être aussi parfaite que possible, sans oublier l'éventualité d'une avance de phase de E par rapport à H.

Cette technique peut paraître archaïque surtout lors de l'étude des plus courtes périodes (à partir de 0,25 s), et c'est pourquoi l'on tend à la remplacer par une évaluation automatique du rapport e/h ⁽¹⁾ (BENDERITTER, DUPIS, MORAT, 1968). Mais la première méthode est la seule qui permette de distinguer parfaitement le phénomène naturel des signaux parasites qui s'y superposent dans bien des cas. L'introduction d'éléments analogiques capables d'effectuer la même tâche se révèle fort délicate pour certaines fréquences et ne peut donner que partiellement satisfaction. Un traitement digital de l'information, actuellement à l'étude, se révélera certainement plus efficace à ce sujet.

L'étude directe des enregistrements permet également une évaluation de la précision avec laquelle les mesures sont effectuées en calculant l'écart moyen des rapports e/h (dix à trente mesures par période analysée). Il est ensuite possible d'éliminer la part de l'erreur incombant à l'appareillage pour apprécier le degré d'uniformité des renseignements fournis par le phénomène lui-même. A titre d'exemple, on peut dire que l'imprécision due aux chaînes de mesure ne dépasse pas 5 % alors que l'écart moyen cité plus haut peut aller de 5 à 15 % ; on en déduit que le phénomène peut être responsable d'une dispersion de 0 à 10 % dans la plupart des cas ⁽²⁾.

3. Calcul de la résistivité apparente.

Une fois le rapport e/h connu, il ne reste plus qu'à effectuer une série de produits dont les termes sont outre e/h , la période T, les coefficients d'étalonnage et les corrections dues à la différence des gains entre les étalonnages et les enregistrements. Ce calcul est donc fort simple et rapide. La courbe de sondage est obtenue en portant les valeurs de ρ_a en fonction de $\sqrt{T}$ sur du papier bilogarithmique (maille 7,5 cm). L'écart moyen des rapports e/h conduit à un écart moyen sur ρ_a dont les valeurs extrêmes sont également repérées sur le diagramme.

⁽¹⁾ On désigne par e/h le rapport des amplitudes sur les voies « telluriques » et « magnétiques » sans qu'il soit tenu compte des étalonnages de ces voies.

⁽²⁾ Il est certain qu'exceptionnellement cette dispersion des rapports e/h peut devenir beaucoup plus grande du fait soit de l'appareillage, soit d'un phénomène trop local ou parasité, soit de structures très complexes du sous-sol.

II. QUELQUES REMARQUES SUR L'INTERPRÉTATION

L'analogie déjà évoquée entre le sondage M. T. et le sondage E se poursuit au moment de l'interprétation. L'utilisation d'abaques se révèle, dans les deux cas, la solution de choix pour obtenir rapidement des résultats quantitatifs. On retrouvera des abaques « deux terrains », des abaques « trois terrains » et des lieux de croix pour l'interprétation des sondages M. T. Mais, de plus, le calcul théorique des courbes de sondage M. T. étant relativement facile, la méthode M. T. se prête très bien à une interprétation par approximations successives. Les deux méthodes présentent certaines dissemblances quant à leur pouvoir de résolution et si l'on peut obtenir des courbes équivalentes pour des structures légèrement différentes en M. T. comme en S. E., ce n'est pas toujours dans les mêmes conditions.

De plus, on verra que l'étude des cas limites d'un substratum infiniment conducteur ou infiniment résistant simplifie beaucoup l'interprétation. On montrera également l'intérêt de la pratique, maintenant courante, des sondages croisés et on terminera par un aperçu de ce que l'on peut tirer de l'interprétation des diagrammes de phases encore peu exploités.

1. Les abaques.

a. Abaques « deux terrains ».

On présente, pour mémoire, les abaques de ρ_a et de phases (θ) (fig. 2 et 3) ⁽¹⁾, en soulignant leur propriété essentielle : la symétrie des courbes par rapport aux droites $\rho = 1 \Omega \cdot m$ ou $\theta = \frac{\pi}{4}$. Cette symétrie évidente sur le dessin complet des abaques se vérifie aisément pour les résistivités lorsqu'au regard des formules ⁽²⁾ donnant ρ_a/ρ_1 pour deux terrains, on constate que l'inversion de ρ_2 change le signe de la seconde partie du résultat. Cela permet de représenter seulement la moitié des courbes théoriques sur l'abaque en se limitant, par exemple, au cas où ρ_2 est supérieur à ρ_1 (fig. 2).

On sait que c'est aux lois de similitude que l'on doit une simplification importante de la technique d'interprétation par abaques. En magnéto-tellurique, L. CAGNIARD a montré que ces lois s'exprimaient par la relation :

$$\frac{K_L}{K_\rho} = K_T$$

si, entre deux structures semblables, les rapports de similitude sont K_L pour les dimensions, K_ρ pour

⁽¹⁾ Les abaques, de par leur principe d'utilisation, ne portent pas d'unités. Seule est indiquée la maille du papier bilogarithmique (sauf pour θ) qui a servi à les construire.

⁽²⁾ Formules [40] et [41], *Ann. de Géophysique*, t. 3, fasc. 2, p. 110 :

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + \frac{4 \cos \frac{2h}{P_1}}{m + \frac{1}{m} - 2 \cos \frac{2h}{P_1}} \quad [40]$$

$$m = \frac{\sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} e^{\frac{2h}{P_1}}}{\sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}} \quad [41]$$

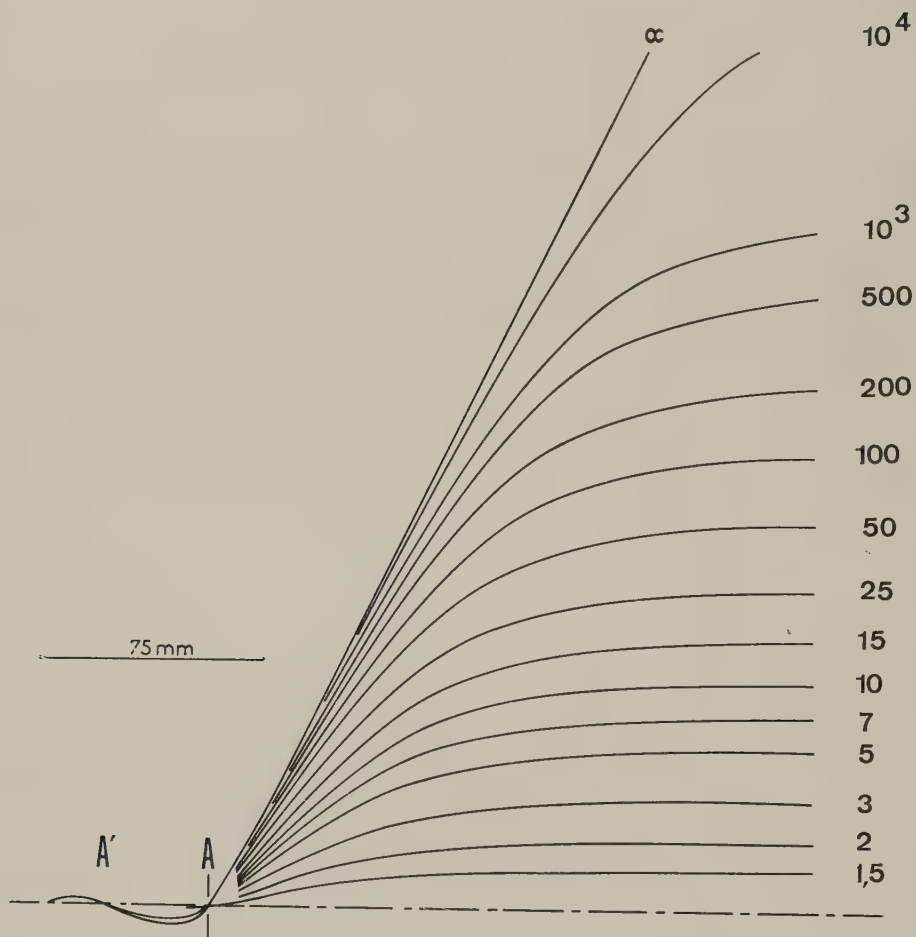


FIG. 2. — Abaque magnéto-tellurique de résistivités pour deux terrains.

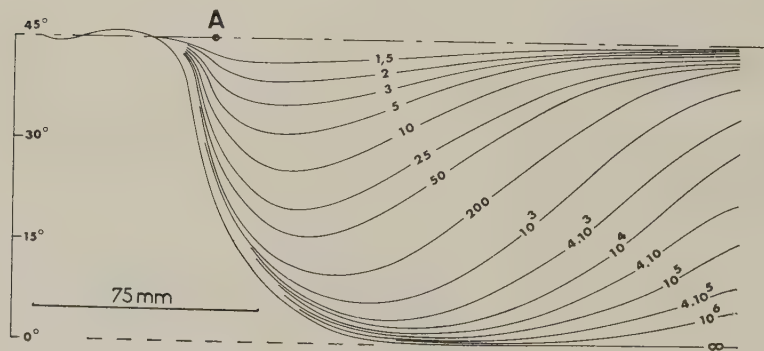


FIG. 3. — Abaque magnéto-tellurique de phases pour deux terrains.

les résistivités, avec une similitude dans le rapport K_T pour les périodes. Cette relation permet de ne conserver qu'un paramètre sur trois pour représenter l'ensemble des courbes « deux terrains ».

b. Abaques « trois terrains ».

L'adjonction d'un terrain supplémentaire introduit deux nouveaux paramètres, il y aura donc, grâce aux lois de similitude, trois infinités de courbes théoriques au lieu de cinq pour représenter toutes les structures possibles.

Les valeurs retenues pour les trois paramètres sont les suivantes, compte tenu des seuls cas véritablement intéressants en prospection :

$$\begin{aligned}
 e_2 : & 0,5 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 7 \quad 10 \quad 15 \quad 20 \quad 30 \quad 40 \quad 50 \quad 100 \quad 200 \quad 500 \text{ km} \\
 \rho_2 : & 2 \quad 5 \quad 10 \quad 20 \quad 50 \quad 100 \quad 200 \quad 500 \text{ et } \frac{1}{2} \quad \frac{1}{5} \quad \frac{1}{10} \quad \frac{1}{20} \quad \frac{1}{50} \quad \frac{1}{100} \quad \frac{1}{200} \quad \frac{1}{500} \quad \Omega \cdot \text{m} \\
 \rho_3 : & 0 \quad \frac{1}{25} \quad 1 \quad 25 \quad \infty \quad \Omega \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

On obtient ainsi un ensemble de quatre-vingts abaques qu'il est commode de présenter sous forme de catalogue (1).

L'axe de symétrie défini précédemment est conservé pour le cas de trois ou de n terrains, mais les conditions que doivent remplir deux structures pour donner lieu à deux courbes symétriques sont un peu plus complexes. Ces conditions sont résumées ci-après :

Structure donnée		Structure symétrique	
ρ	e	ρ	e
1	1	1	1
ρ_2	e_2	$1/\rho_2$	e_2/ρ_2
ρ_3	∞	$1/\rho_3$	∞

On voit que si les résistivités de la structure « symétrique » sont bien les inverses de celles de la structure donnée, l'épaisseur de son second terrain doit être par contre divisée par la résistivité de ce même terrain dans la structure donnée.

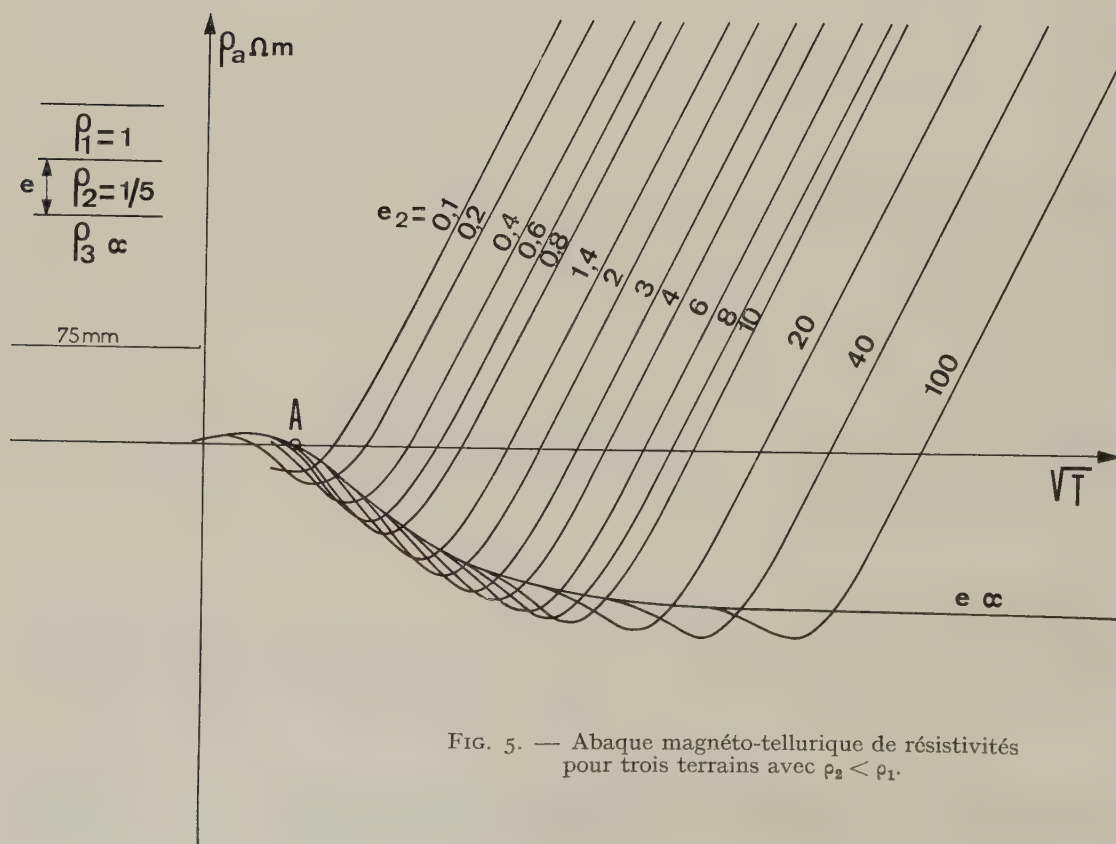
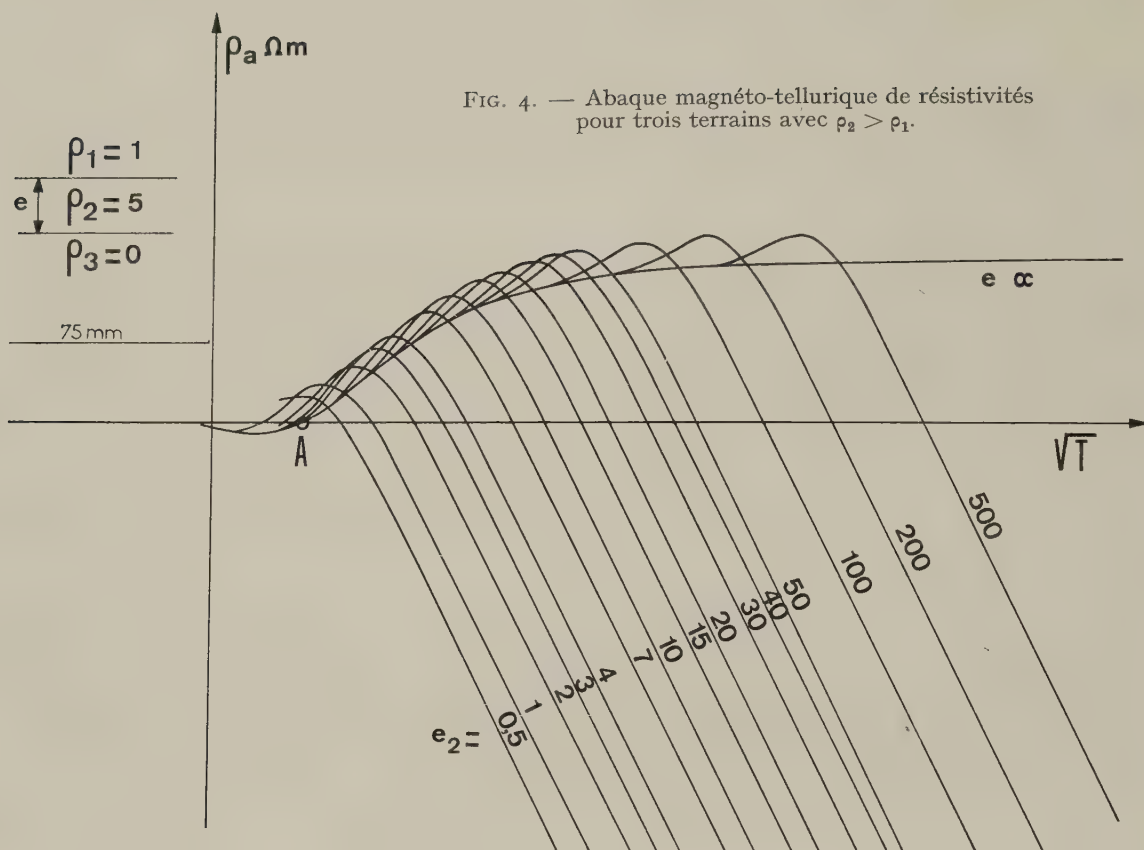
L'axe de symétrie est conservé aussi dans le cas « n terrains ». Si les paramètres du $(n-1)^{\text{ème}}$ terrain d'une structure sont ρ_{n-1} et e_{n-1} , on en déduit par récurrence ceux de la structure « symétrique » qui seront : $\frac{1}{\rho_{n-1}}$ et $\frac{e_{n-1}}{\rho_{n-1}}$.

Une fois calculés les abaques correspondant à $\rho_2 > \rho_1$, les conditions de symétrie permettent d'en déduire les abaques correspondant à $\rho_2 < \rho_1$ dont les paramètres se déterminent d'après les schémas précédents. On constate ainsi que pour le groupe des abaques où ρ_2 est inférieur à ρ_1 les coefficients e_2 sont très différents de ceux que l'on a cités précédemment, qui concernent seulement le cas où ρ_2 est supérieur à ρ_1 (fig. 4 et 5).

c. Abaques de croix.

La solution du catalogue pour l'interprétation des courbes « trois terrains » n'est cependant pas très élégante. On sait qu'on lui substitue volontiers, dans le cas du sondage électrique, l'utilisation

(1) Ce catalogue est disponible à la S. A. P. A., 102, av. Jean-Jaurès, 94-Saint-Maur.



d'abaques dits de « croix à droite » ⁽¹⁾. Il s'agit tout simplement, considérant une courbe « trois terrains » comme résultant approximativement de la juxtaposition de deux éléments de courbes « deux terrains », de déterminer la croix (à gauche) correspondant aux deux premiers terrains, puis la croix (à droite) caractéristique des deuxième et troisième terrains. Il n'y a aucun obstacle, a priori, à la construction de ce type d'abaques en M. T.

Lorsque l'influence du second terrain est suffisamment importante du fait soit de son épaisseur, soit de son contraste de résistivité avec le premier terrain, la courbe de ρ_a présente un palier dès qu'elle atteint la valeur de ρ_2 . Dans ce cas précis, le recours à l'abaque de croix est inutile car on peut interpréter individuellement les deux courbes « deux terrains » situées de part et d'autre de ce palier. Cependant, on constate ainsi que le lieu de croix rejoindra la courbe « trois terrains » sur son asymptote ρ_3 (fig. 6). Si, au contraire, le deuxième terrain est peu épais et sa résistivité apparente peu différente de ρ_1 la courbe expérimentale en sera peu affectée ; à la limite, $e_2 = 0$, on obtiendra une courbe « deux terrains », le point A de l'abaque « deux terrains » est donc aussi un point du lieu recherché.

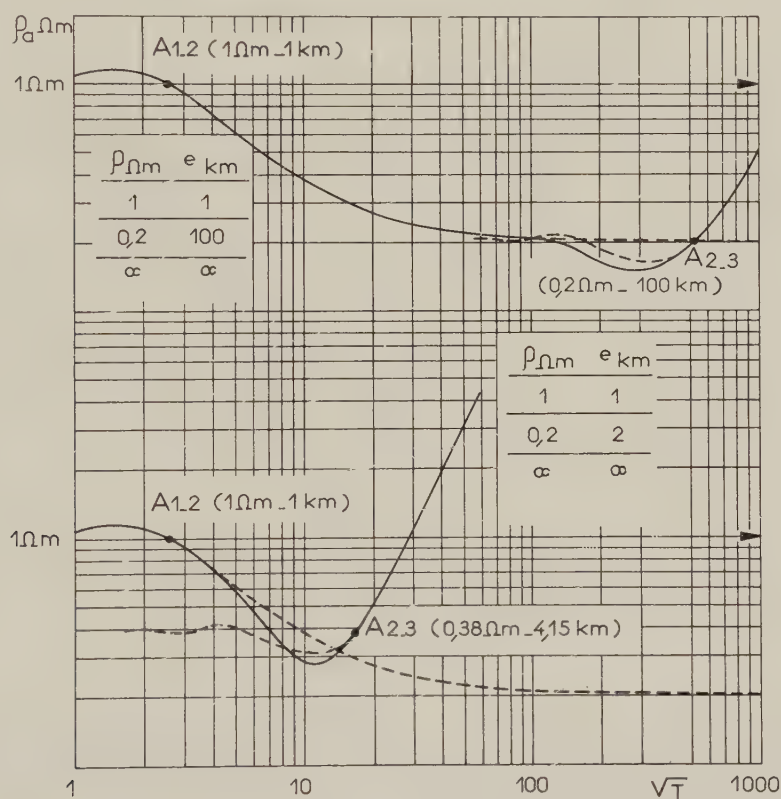


FIG. 6. — Décomposition d'une courbe « trois terrains » en deux courbes « deux terrains » :

- en haut : forte influence du second terrain. L'interprétation individuelle des deux courbes « deux terrains » fait connaître la structure « trois terrains ».
- en bas : l'influence du second terrain est plus faible. La méthode précédente ne permet pas de connaître e_2 ni ρ_2 .

⁽¹⁾ Lors de l'interprétation d'une courbe « deux terrains » en sondage E, c'est en lisant les coordonnées de la croix de l'abaque sur le diagramme expérimental transparent convenablement placé, que l'on détermine les paramètres du premier terrain. Pour la méthode M. T. c'est le point A qui joue le rôle de cette croix. On parlera donc par la suite indifféremment de point A à droite ou de croix à droite.

Dans le cas général la courbe montre bien l'existence du deuxième terrain sans présenter cependant un palier d'ordonnée ρ_2 . La décomposition de cette courbe en deux courbes « deux terrains » est alors un peu arbitraire (fig. 6) et le point A_{2-3} à droite ainsi déterminé ne permet pas de connaître directement les valeurs exactes de e_2 et de ρ_2 (fig. 6).

Comme les points A à droite sont fixés d'après l'étude de la partie droite de la courbe (concernant les deuxième et troisième terrains), il est clair qu'il y aura autant de feuilles de lieux de croix qu'on aura choisi de valeurs pour le paramètre ρ_3 . Chaque lieu de croix remplace une famille de courbes « trois terrains », soit une feuille du catalogue « trois terrains ». Les points de chaque lieu correspondant à une même valeur de e_2 sont reliés entre eux (fig. 7). On voit que, sauf au voisinage de A, ces points s'alignent sur des droites de pente -2 pour l'abaque présenté ici.

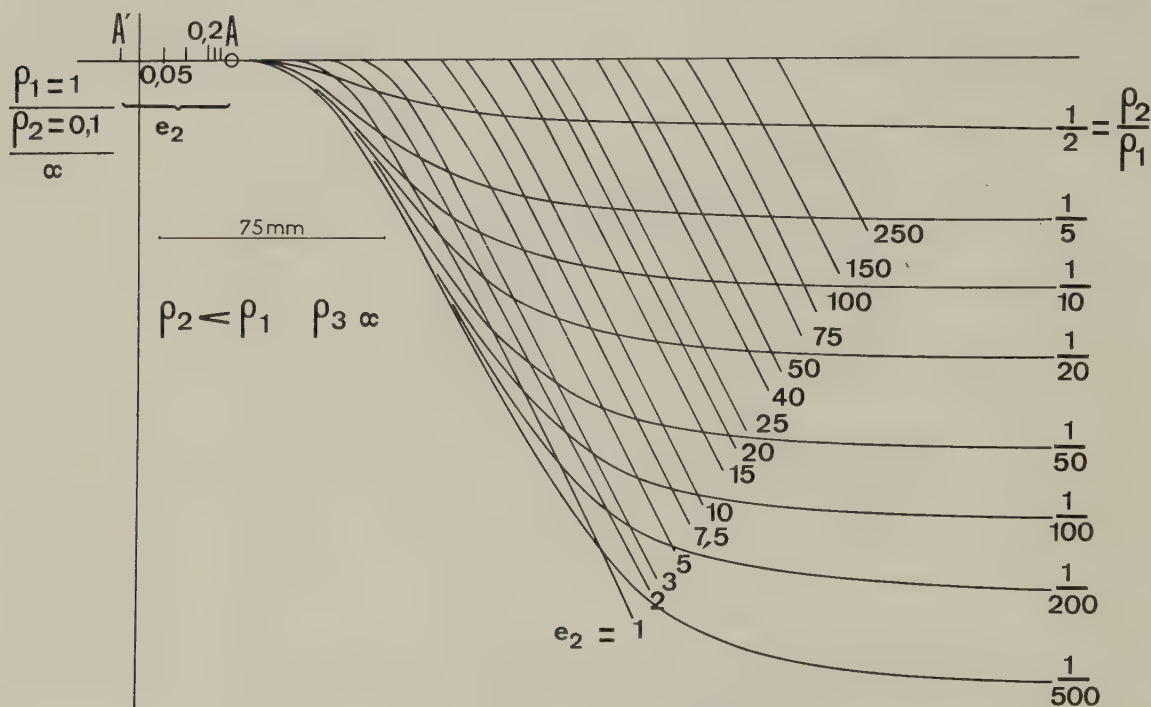


FIG. 7. — Un abaque de croix magnéto-tellurique.

L'interprétation des courbes « trois terrains » avec ces abaques de croix consistera donc à :

1) Déterminer avec l'abaque « deux terrains » les coordonnées de A pour les deux premiers terrains (on connaîtra ainsi ρ_1 et e_1), noter le rapport ρ_2/ρ_1 et choisir la valeur du paramètre ρ_3 en ne considérant que la seconde partie de la courbe.

2) Choisir la feuille de lieux de croix correspondant à cette valeur de ρ_3 .

3) Caler le point A (déterminé en 1) du diagramme expérimental sur celui de l'abaque de croix, relever l'indice de la courbe des iso-rapports e_2/e_1 qui passe ou qui passerait par l'intersection de la courbe expérimentale avec le lieu de croix correspondant au rapport ρ_2/ρ_1 retenu.

On complète ainsi l'interprétation puisque seul e_2 était inconnu après l'emploi de l'abaque « deux terrains ».

Il faut ajouter que les choses se compliquent un peu lorsque l'influence du second terrain est très

faible car la courbe expérimentale ne passe plus par A, mais elle passe toujours en A' ⁽¹⁾ (fig. 7) et recoupe l'axe des abscisses entre A' et A d'autant plus près de A' que e_2 est plus faible. Il est possible de graduer l'écart entre A' et A en valeurs croissantes du rapport e_2/e_1 mais cette graduation n'est valable que pour une valeur donnée du paramètre ρ_2 car, par suite de « l'équivalence » ⁽²⁾ des courbes, les graduations repèrent en fait les valeurs du rapport e_2/ρ_2 . C'est pourquoi, sur la figure 7, on a indiqué la valeur de ρ_2 choisie ($\rho_2 = 1/10 \rho_1$). L'interprétation ne pourra être menée à bien, dans ce cas, que si l'on parvient par ailleurs à connaître la valeur de ρ_2 .

d. Abaque auxiliaire.

En sondage E les abaques auxiliaires sont couramment utilisés (ORELLANA, MOONEY, 1966). Il faut, dans cette technique, un abaque différent pour chaque valeur de la résistivité du dernier terrain (en pratique quatre cas). Cela tient à ce que les conditions d'équivalence sont complexes et même en partie empiriques. En M. T. les conditions d'équivalence sont simples (BERDICHEVSKI, 1960) et se réduisent à ces deux formules :

$$e' = \sum e_i$$

$$S' = \sum S_i \quad \text{avec} \quad S_i = \frac{e_i}{\rho_i}$$

On peut donc en M. T. substituer facilement un seul terrain à deux autres. Ce terrain « équivalent » aura une épaisseur égale à la somme des épaisseurs des terrains qu'il remplace et une résistivité définie par $\rho' = \frac{\sum e_i}{\sum S_i}$. En procédant de proche en proche il est bien sûr possible de substituer ainsi une seule couche à un nombre quelconque de terrains. La simplicité de ces relations, le fait que la résistivité des terrains sous-jacents n'y intervient pas, conduit à la construction d'un seul abaque auxiliaire M. T.

Sur la figure 8 on présente cet abaque pour le cas : $\rho_2 > \rho_1$.

L'utilisation de cet abaque pour l'interprétation des courbes est strictement semblable à celle qui est décrite par ORELLANA-MOONEY pour le sondage E :

1) A l'aide de l'abaque deux terrains marquer sur le diagramme expérimental (sur calque) le point A qui correspond aux deux premiers terrains, on en déduit ρ_1 , e_1 et ρ_2/ρ_1 .

2) Superposer le calque sur l'abaque auxiliaire en plaçant le point A du calque sur celui de l'abaque.

3) Tracer sur le calque la courbe correspondant au rapport ρ_2/ρ_1 déterminé en 1.

4) Replacer le calque sur l'abaque deux terrains et le déplacer en gardant les axes des deux feuilles bien parallèles, jusqu'à ce que la partie droite du diagramme se superpose à une courbe de l'abaque. Pendant cette opération le point A de l'abaque doit décrire la courbe auxiliaire qui vient d'être tracée.

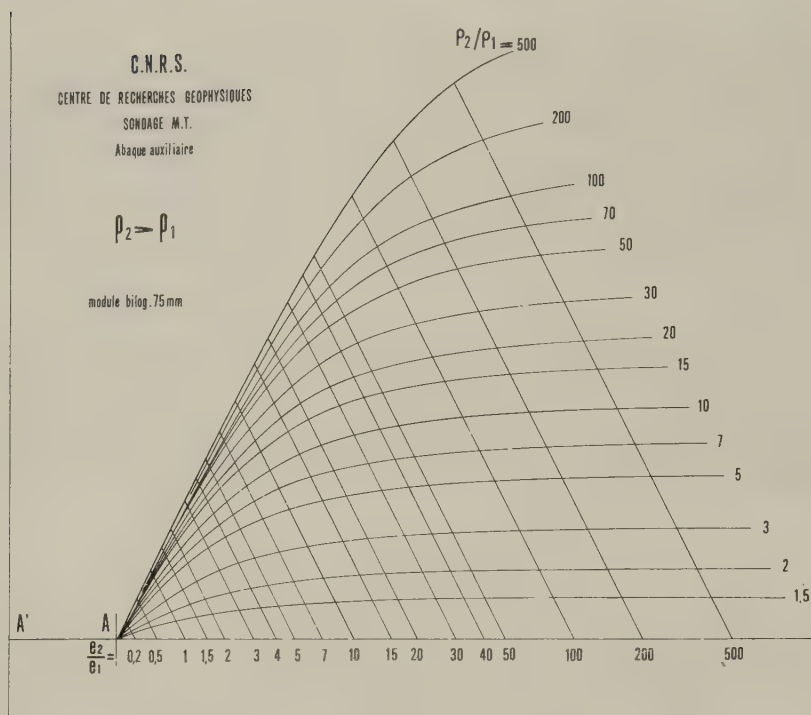
5) Sur le calque placer une croix correspondant au point A de l'abaque lorsque la coïncidence recherchée en 4 est obtenue, lire la valeur de ρ_3 .

6) Placer à nouveau le calque sur l'abaque auxiliaire en mettant en coïncidence le point A à gauche du calque avec celui de l'abaque, la croix se trouve alors sur (ou très proche d') une droite de pente — 2. Cette droite est affectée d'un coefficient e_2/e_1 , on détermine alors e_2 .

Pour plus de trois terrains, on procède de proche en proche, mais la précision des déterminations diminuant assez rapidement il est préférable de vérifier les modèles obtenus par un calcul. Le rôle des abaques de croix ou de l'abaque auxiliaire est d'ailleurs avant tout de permettre une sélection des modèles à proposer au calcul. L'interprétation des courbes M. T. est alors rapide et sûre.

⁽¹⁾ A' second point d'intersection des courbes « deux terrains » avec l'axe des abscisses.

⁽²⁾ Voir paragr. 3 : Pouvoir de résolution.

FIG. 8. — Abaque auxiliaire M.T. pour $\rho_2 > \rho_1$.

2. Calcul théorique des courbes de ρ_a .

Lorsque la courbe expérimentale indique la présence de plus de trois terrains il est encore possible, dans les cas simples, d'utiliser les abaques construits en confondant plusieurs terrains en un seul terrain équivalent et en procédant de proche en proche. Cette méthode est cependant d'une application délicate et il est plus élégant, surtout dans les cas difficiles, de lui substituer le calcul direct du sondage. Ce calcul dont les formules sont établies depuis longtemps (CAGNIARD, 1953) a été effectué depuis 1962 (BENDERITTER, DUPIS, TIGER) au moyen d'un abaque des tangentes complexes, puis à partir de 1964 (BUREAU, TIGER, puis PHAM, etc.) à l'aide d'un programme pour machine IBM valable pour des modèles comportant jusqu'à dix terrains, ces travaux n'ont donné lieu à aucune publication jusqu'ici.

Les expressions algébriques qui composent ce calcul étant bien plus simples que pour le sondage E, le calcul de modèles théoriques est beaucoup plus largement utilisé dans l'interprétation magnéto-tellurique.

Si les techniques actuelles d'interprétation des sondages M. T. se rapprochent beaucoup des méthodes classiques qui consistent à traiter du point de vue du mathématicien le problème « direct » (partir de structures données et des courbes théoriques correspondantes et conduire l'interprétation par comparaisons et approximations successives), on envisage, avec l'appoint des courbes de phases, de traiter le problème « inverse » qui permettrait, en fournissant à la machine les données recueillies sur le terrain, de se voir révéler la structure qui les a produites. Notons que cette solution est très séduisante, mais on ne doit pas oublier que s'il est vrai du point de vue théorique qu'une structure donne lieu à une seule courbe, il n'en est pas moins vrai du point de vue expérimental que vu l'imprécision inexorable des mesures, une courbe peut représenter plusieurs structures légèrement différentes. C'est ce que l'on va développer dans le paragraphe suivant.

3. Pouvoir de résolution.

On ne se propose pas ici de traiter ce sujet de façon exhaustive, mais simplement de l'illustrer par quelques exemples précis.

Les paramètres de Darr-Zarrouk (R. MAILLET, 1947) seront d'une grande utilité ; on en rappelle la définition :

S : est la conductance longitudinale du terrain ; c'est la conductance d'un prisme de section unité, d'axe normal aux couches et parcouru par un courant perpendiculaire à cet axe. $S = \frac{h}{\rho}$ (h : hauteur du prisme ; ρ : résistivité du terrain).

T : est la résistance transversale du terrain ; c'est la résistance du même prisme parcouru par un courant parallèle à son axe $T = h \cdot \rho$.

Dans le cas du sondage E, des courbes trois terrains correspondant à une couche conductrice mince entre deux couches résistantes peuvent être équivalentes, c'est-à-dire entièrement confondues — au moins sur le diagramme — lorsque les couches minces ont même coefficient S (ORELLANA-MOONEY, 1966). Il en est de même dans le cas d'une couche résistante située entre deux couches conductrices si le coefficient T est le même pour les couches minces (fig. 9).

En magnéto-tellurique, il n'en va pas de même dans tous les cas. En effet, si les conditions d'équivalence sont identiques à celles du sondage E lorsqu'une couche conductrice est intercalée entre deux couches résistantes (coefficients S identiques), dans l'autre cas, les courbes peuvent être confondues à égalité d'épaisseur de la couche résistante quelle que soit sa résistivité (fig. 10).

Cette seconde condition d'équivalence est moins gênante que dans le cas du sondage E, car il est préférable de connaître l'épaisseur d'un terrain en ignorant sa résistivité que de déterminer un produit $h \cdot \rho$ dont on ignore les deux termes.

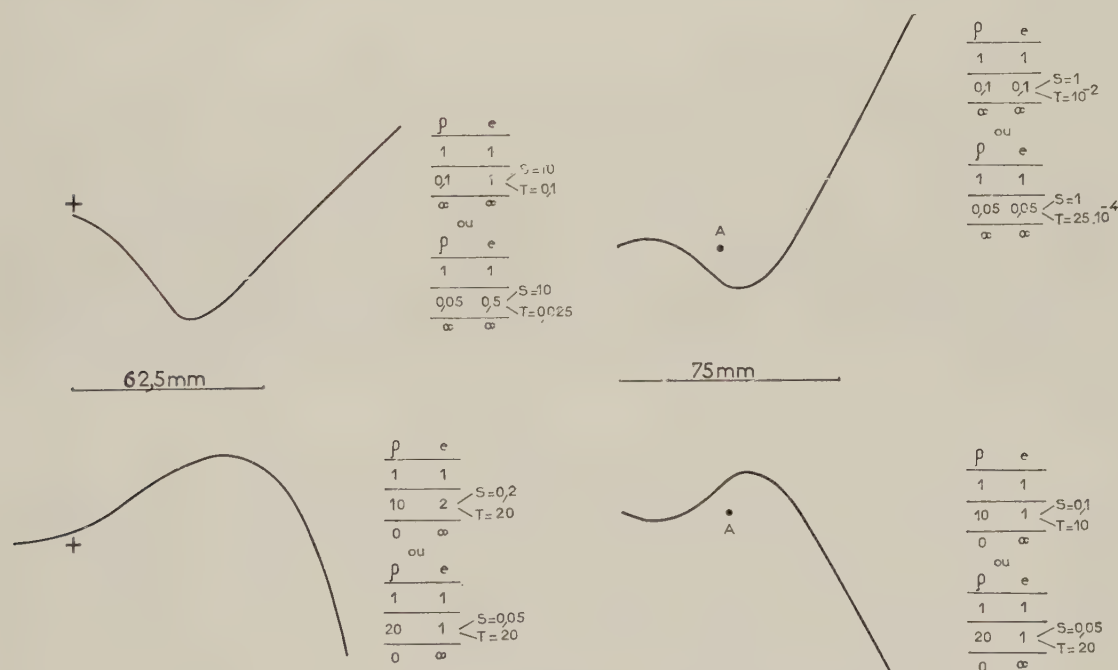


FIG. 9. — Cas d'équivalence en sondage électrique d'après ORELLANA et MOONEY.

FIG. 10. — Cas d'équivalence en magnéto-tellurique.

Pour comparer le pouvoir de résolution du sondage M. T. et celui du sondage E on va considérer deux propriétés ; la première sera l'épaisseur maximale à laquelle peut se produire une équivalence, la seconde sera l'épaisseur que doit atteindre le second terrain pour que ρ_a se confonde avec ρ_2 ⁽¹⁾ :

1) Intercalation d'une couche résistante entre deux couches conductrices, équivalence à partir de $e_2 = 0$ jusqu'à :

$$\begin{cases} \text{M. T.} & e_2 = 5 \\ \text{E} & e_2 = 5 \end{cases}$$

2) Intercalation d'une couche conductrice entre deux couches résistantes, équivalence à partir de $e_2 = 0$ jusqu'à :

$$\begin{cases} \text{M. T.} & e_2 = 0,8 \\ \text{E} & e_2 = 3 \end{cases}$$

3) ρ_a est confondu avec ρ_2 pour :

— couche résistante :

$$\begin{cases} \text{M. T.} & e_2 = 100 \\ \text{E} & e_2 = 100 \end{cases}$$

— couche conductrice :

$$\begin{cases} \text{M. T.} & e_2 = 5 \\ \text{E} & e_2 = 20 \end{cases}$$

Il est aisé de constater que si le pouvoir de résolution est identique dans le cas d'intercalation de couches résistantes, celui de la M. T. est d'environ quatre fois supérieur à celui du S. E. s'il s'agit de couches conductrices.

4. Cas limites.

Ce sont les cas où l'un des terrains est soit infiniment résistant, soit très conducteur (ce qui se traduit par des courbes dont les pentes sont égales à $+2$ ou -2). L'expression de la résistivité apparente en fonction de T se simplifie et offre ainsi de nouvelles possibilités à l'interpréteur.

La présence d'un terrain très conducteur provoque l'apparition de la pente limite égale à -2 sur la courbe de ρ_a , or quel que soit l'emplacement du point sur cette droite, l'épaisseur calculée d'après ses coordonnées est toujours la même. Ainsi, d'une courbe expérimentale comportant une portion de droite de pente -2 on est assuré de tirer au moins l'épaisseur des terrains surmontant la couche conductrice. Il n'y a indétermination sur le nombre et la nature des terrains sus-jacents que dans la mesure où l'on n'aurait obtenu que des points expérimentaux alignés sur cette droite de pente -2 .

⁽¹⁾ Ces deux comparaisons sont effectuées pour les coupes géo-électriques suivantes :

ρ	e	ρ	e
1	1	1	1
n	m	$1/n$	m
0	∞	∞	∞
avec $n = 10$	et	$n = 20$.	

Avec la M. T. une équivalence parfaite pour les couches conductrices minces est pratiquement impossible pour une structure à trois terrains, elle ne devient effective qu'en présence de plus de trois couches.

a) Dans le cas d'un substratum conducteur surmonté d'une seule couche (d'épaisseur h et de conductibilité σ_1), l'expression de l'impédance indique déjà la simplification permise (CAGNIARD, 1953) :

$$\frac{E_x}{H_y} = \frac{1}{\sqrt{\sigma_1 T}} \frac{h}{P_1} \quad (\text{unités électromagnétiques})$$

si la profondeur de pénétration P_1 est très supérieure à h , c'est-à-dire si les variations M. T. correspondant à la période étudiée pénètrent déjà profondément le substratum. La résistivité apparente et la profondeur peuvent s'exprimer sous la forme suivante :

$$\rho_a = \frac{4\pi^2 h_1^2}{5 T} \quad ; \quad h = \sqrt{\frac{Y}{8}} \\ (\Omega \cdot m, s, km) \quad (km)$$

où Y est l'intersection de la droite $\sqrt{T} = 1$ avec la droite de pente -2 . PORSTENDORFER (1965) préfère prendre l'intersection $(\sqrt{T_0}, 1)$ de la droite précédente avec la droite $\rho_a = 1$, ce qui le conduit à :

$$h = 0,356 \sqrt{T_0} \\ (km, s)$$

b) Dans le cas d'un substratum très résistant l'impédance s'exprime par :

$$\frac{E_x}{H_y} = \frac{1}{2\sqrt{\sigma_1 T}} \frac{P_1}{h} \quad (\text{unités électromagnétiques})$$

ce qui conduit à :

$$h = \frac{\rho_1}{\sqrt{8Y}} \quad \text{ou} \quad h = 0,356 \rho_1 \sqrt{T_0} \\ (km, \Omega \cdot m) \quad (km, \Omega \cdot m, s)$$

si une seule couche repose sur le substratum on a la possibilité de connaître très facilement ρ_1 par d'autres méthodes (sondage E, électromagnétisme, carottage électrique...), mais si le sous-sol est plus complexe il faut tenir compte des paramètres σ_i et h_i de chaque couche et la conductance de l'ensemble des terrains de recouvrement est $\sum \sigma_i h_i$. On n'a pas accès directement à cette conductance mais on peut la déduire de l'étude de logs électriques de forages par exemple, ou bien la calculer en effectuant un sondage à un endroit où seule la cote du socle est connue, en posant :

$$\sum \frac{h_i}{\rho_i} = \frac{H}{\rho_s} \quad (1) \\ (\Omega \cdot m, km)$$

L'analyse d'une seule période peut conduire à une interprétation quantitative à condition que le point correspondant soit bien sur la droite de pente limite $+2$. Dans ce cas seulement, on obtient :

$$H = \frac{\rho_s}{2\pi} \sqrt{\frac{5T}{\rho_a}} \\ (km, \Omega \cdot m, s)$$

(1) H et ρ_s étant l'épaisseur et la résistivité moyenne de l'ensemble des terrains sus-jacents.

Cette technique n'est autre que le profilage M. T. imaginé par BERDICHEVSKI dès 1959, procédé largement utilisé en U. R. S. S. depuis cette date. Son utilisation présente certains dangers car ρ_s peut varier sur l'étendue d'un bassin important (par passages latéraux, biseautages, plis, etc.). Il est donc conseillé de s'assurer de la constance de ρ_s avant de proposer des interprétations trop catégoriques.

5. Sondages croisés.

Nous avons pris l'habitude d'effectuer deux courbes par station en enregistrant simultanément les quatre composantes horizontales du phénomène naturel : E_x , H_y et E_y , H_x . Sur un terrain répondant parfaitement aux hypothèses de la théorie établie par CAGNIARD (1953), les deux courbes seraient rigoureusement identiques. Mais en fait, il est bien rare que la plus calme des sédimentations ne présente pas la moindre trace d'anisotropie. Les deux courbes diffèrent donc presque toujours mais à des degrés divers. Si l'on a une idée des directions tectoniques de la région, il sera judicieux d'orienter les lignes telluriques suivant la direction structurale dominante et la perpendiculaire à celle-ci. Les divergences peuvent se manifester sur l'ensemble de la courbe ou au contraire dans un intervalle quelconque de périodes correspondant à un seul terrain.

Malgré ces dissemblances il est fréquent que l'interprétation des deux courbes considérées intrinsèquement conduise à deux coupes géo-électriques différentes par les résistivités, mais semblables quant aux épaisseurs, paramètres les plus appréciés des prospecteurs. Il peut arriver aussi qu'anisotropie et rapports de résistivité s'agencent de telle façon que le socle électrique ne corresponde pas au même étage géologique sur les deux coupes et nous insisterons pour que l'on définisse avec soin ce terme de socle dont l'acception peut varier d'un interlocuteur à l'autre.

L'interprétation des sondages croisés les plus complexes est délicate à partir des documents analogiques que nous recueillons actuellement car ils n'offrent pas la souplesse d'une information sous forme digitale qu'il est possible de traiter par différents programmes sans alourdir le travail de dépouillement, ni sans allonger par trop les délais. Il serait bénéfique de pouvoir suivre les changements de polarisation au cours du temps et leurs effets sur une structure complexe pour mieux comprendre certaines anomalies ⁽¹⁾.

6. Courbes de déphasages.

S'il était prévu (CAGNIARD, 1953), et plusieurs auteurs l'ont confirmé par des études ultérieures, que les courbes du déphasage θ en fonction de $\sqrt{T}$ n'apportent qu'une confirmation des informations contenues dans le diagramme des ρ_a , il n'est cependant pas inutile d'insister un peu sur les particularités de cette source complémentaire de renseignements.

L'abaque des θ (fig. 3) pour « deux terrains » montre, d'une part, des oscillations de faible amplitude autour de la droite $\theta = \frac{\pi}{4}$ et, d'autre part, des pentes plus importantes que son équivalent en ρ_a ce qui peut se révéler plus favorable dans l'étude des cas complexes où l'on peut manquer de précision quand on se borne à interpréter la courbe des ρ_a .

Mais l'apport principal des phases provient du décalage des informations en fonction de T entre cette courbe et celle des résistivités. En effet si l'on considère le point commun le plus à droite dans les deux réseaux de courbes théoriques, ce point a pour abscisse $\sqrt{T} = 8$ dans l'abaque des

⁽¹⁾ Fortes dispersions des rapports E/H à certaines fréquences. Pentes anormalement élevées. Divergences anormales entre ρ_x et ρ_y .

ρ_a et $\sqrt{T} = 4$ dans l'abaque des θ . Ceci est une conséquence des relations donnant l'intersection des courbes du réseau ρ_a avec la droite $\rho = 1$ et des courbes du réseau θ avec la droite $\theta = \frac{\pi}{4}$ (CAGNIARD, 1953).

Dans le premier cas :

$$\cos \frac{2}{P_1} = 0. \quad \text{D'où, avec} \quad P_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\rho T}$$

(unités électromagnétiques)

$$\sqrt{T} = \frac{8}{2n+1}$$

Dans le second cas :

$$\sin \frac{2}{P_1} = 0$$

et, pour la même raison :

$$\sqrt{T} = \frac{4}{n}$$

En conséquence, lorsque $\sqrt{T} = 8$, la courbe de ρ_a coupe l'axe des abscisses alors que la courbe de θ l'a déjà fait bien avant (pour $\sqrt{T} = 4$), le décalage s'accroît d'ailleurs quand T s'accroît ⁽¹⁾, si bien qu'en cas de difficultés (parasites) ou d'imprécisions sur les ρ_a à certaines fréquences, on peut envisager de compléter les informations par des résultats obtenus avec les décalages de phases correspondant à des fréquences plus favorisées.

7. Conclusion.

On a traité dans les paragraphes précédents de l'interprétation parfois originale d'une courbe de sondage M. T. considérée intrinsèquement. On verra dans le chapitre suivant que l'interprétation d'un ensemble cohérent de mesures s'effectue en utilisant aussi les techniques classiques des méthodes électriques conventionnelles.

III. EXEMPLE D'APPLICATION A UNE PROSPECTION DE GRANDE RECONNAISSANCE

Cette étude a été réalisée pour l'Entreprise de Recherches et d'Activités Pétrolières (E. R. A. P.) ⁽²⁾ qui a permis la publication de certains résultats. Il n'est pas possible, bien sûr, d'exposer tous les enseignements de cette mission, cela ne nous privera pas cependant d'apprécier et de discuter les résultats obtenus en fonction des connaissances déjà acquises et des hypothèses les plus sérieuses qu'elles purent susciter.

Le territoire à étudier s'étend sur environ 10 000 km² et la densité des sondages est faible (1 pour 500 km²). En pareil cas il se présente essentiellement deux façons d'opérer : ou bien concentrer l'étude sur un ou deux points particuliers afin d'obtenir d'emblée des renseignements précis, ou

⁽¹⁾ Dans le cas de « deux terrains ».

⁽²⁾ Nous tenons à exprimer nos remerciements à M. FERRODON qui a bien voulu autoriser la publication de ce texte et à MM. BOLUSSET, DAME et DISCHER qui nous ont communiqué leurs connaissances et leurs hypothèses sur la région prospectée.

bien disperser les points de mesure de façon à vérifier les grandes lignes structurales en évitant de se confiner dans des zones trop perturbées par leur géologie ou par leur activité industrielle.

On a opté pour une solution qui procède à la fois des deux techniques envisagées ci-dessus, en plaçant des sondages dans chaque région naturelle du pays et en concentrant quelques mesures sur un profil particulièrement intéressant.

La région prospectée n'est rien moins que favorable. D'abord elle est fortement montagneuse, creusée de profondes vallées. D'autre part, on sait que la tectonique, en surface comme en profondeur, n'est pas moins compliquée que la topographie. Un certain nombre de forages ont démontré l'existence de multiples chevauchements.

1. Situation géologique.

De façon un peu plus précise le domaine prospecté se décompose naturellement en trois zones structurales.

— A l'est on note une zone haute du socle qui affleure pratiquement en maints endroits. Dans l'ensemble, la couverture sédimentaire est relativement peu épaisse, le socle s'enfonçant brutalement à la faveur d'un grand accident vers l'ouest et plus lentement vers l'est.

— La zone centrale au contraire est caractérisée par une épaisse sédimentation à dominante marneuse couronnée de quelques reliefs calcaires. C'est cependant la couverture souple qui a imposé ses réactions aux efforts tectoniques. Deux phases paraissent essentielles, la première provoquant des structures E.-O. tandis que la seconde jouait perpendiculairement à celle-ci ; vers le nord, cette dernière phase fut largement dominante.

— La troisième zone, au S.-O., est surtout faite de reliefs calcaires orientés E.-O. Ce matériau très résistant a réagi par des cassures aux poussées tectoniques, les directions principales étant N.-S. et N.-O.-S.-E., bien distinctes des axes de plis E.-O.

Le socle est peu connu. Il convient d'ailleurs de remarquer la diversité des définitions attribuées à ce terme. En ce qui nous concerne, c'est habituellement le dernier terrain résistant rencontré. Il arrive parfois que le contraste des résistivités entre socle et terrain sédimentaire, trop faible, provoque une certaine indétermination lors de l'interprétation. Cet inconvénient se présente aussi lorsque la résistivité s'accroît progressivement avec la profondeur. A cet égard, les problèmes du géophysicien sont du même ordre que ceux du géologue en face des terrains métamorphiques par exemple.

2. Données géophysiques et géologiques.

Elles consistent essentiellement en de précieux documents fournis par les forages expérimentaux effectués non loin de nos points de mesure. Une douzaine de logs électriques provenant de ces forages ont ainsi permis l'établissement de coupes géo-électriques typiques de la région. Il faut cependant prendre garde de n'attribuer à ces documents qu'une valeur très locale dans une région de structure si complexe. On constate d'ailleurs très vite que des forages voisins peuvent révéler des coupes stratigraphiques très différentes par suite de variations de faciès, biseautages, failles, plis, chevauchements, etc.

D'autre part, peu de forage ont atteint le socle et c'est d'ailleurs le but de notre travail que de tenter de préciser sa cote.

Il est un document essentiel que l'on peut tirer de toutes ces informations, c'est la courbe théorique du sondage M. T. qui serait effectuée à l'emplacement du forage. On obtient ainsi une bonne image de ce que devraient donner les mesures réalisées au voisinage immédiat de ce forage. Il va sans dire que la courbe théorique sera d'autant plus précieuse que le trépan aura atteint des couches

plus profondes. Les indications concernant les couches superficielles, que seule l'étude de fréquences plus élevées pourrait fournir, présentent aussi un certain intérêt dans la mesure où elles diffèrent des indications relatives aux couches plus profondes. On peut alors, en quelque sorte, compléter la courbe expérimentale et procéder à une interprétation plus précise.

Nous avons eu d'autre part connaissance des résultats d'une prospection aéromagnétique et des conclusions de nombreux travaux géologiques effectués sur le terrain.

L'ensemble de ces données préliminaires se traduit par la constitution d'un véritable dossier comprenant à la fois des indications générales sur la région concernée par cette prospection, et une étude détaillée sur chaque point de mesure exposant les résultats acquis et les hypothèses à préciser ou à infirmer.

3. Les mesures sur le terrain.

Elles se sont déroulées dans de bonnes conditions climatiques qui firent oublier l'inconvénient d'avoir une cinquantaine de kilomètres à parcourir en moyenne pour atteindre chaque station. La répartition des stations interdisait l'installation d'une véritable base, c'est pourquoi nous avons changé deux fois de point de départ afin de maintenir la cadence du sondage quotidien.

L'équipe étant assez nombreuse (quatre géophysiciens dont un électronicien, un agent technique et deux ou trois stagiaires), il était possible de confier le choix de l'emplacement exact des stations et les travaux de topographie à deux personnes qui travaillaient ainsi indépendamment des autres. En dehors de la mise en station et du départ, le sondage n'exige qu'une ou deux personnes pour la surveillance des enregistrements, l'analyse en direct ou par le play-back. Une autre partie de l'équipe pouvait ainsi se consacrer au dépouillement des premiers enregistrements. Les premières courbes furent obtenues de cette façon pendant le déroulement de la mission et les enseignements qui en furent tirés ont permis de proposer l'étude d'un profil particulier.

Chaque station a donné lieu à un sondage croisé, méthode préférable dans une région aussi complexe. Un seul défaut d'un capteur magnétique nous a privé d'une courbe à la station 19.

Nous présentons quelques courbes typiques des trois familles dans lesquelles nous avons pu classer les trente-neuf diagrammes résultant de cette prospection (fig. 11).

L'étude statistique réalisée sur l'ensemble des mesures apporte des conclusions intéressantes ; les chiffres obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

	LIGNE TELLURIQUE N.-S.	LIGNE TELLURIQUE E.-O.	MOYENNE GÉOMÉTRIQUE DES ρ_a
Classe modale.....	20-25	15-20	20-25
Fréquence relative de la classe modale. . .	19 %	23 %	25 %
Médiane.....	26,4	21,1	23,7
Moyenne arithmétique.....	28,5	23,0	24,6

Ils traduisent en pourcentage les caractéristiques de l'écart moyen calculé lors du dépouillement des enregistrements quant aux rapports e/h lus sur le papier. Les histogrammes font apparaître une distribution unimodale de la dispersion, la fréquence de la classe modale étant bien supérieure

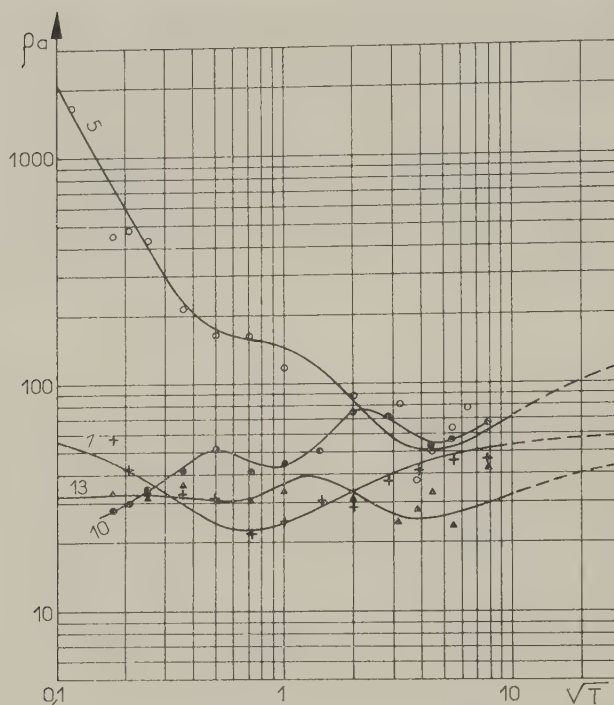


FIG. 11. — Quelques courbes expérimentales.

à celle des autres classes. Les mesures suivant la direction E.-O. sont légèrement meilleures que selon la direction N.-S. quant à leur précision.

La distribution de la dispersion n'est pas exactement gaussienne pour les deux directions de mesure, elle s'en approche davantage pour la moyenne géométrique dont nous verrons l'utilité plus loin. On peut retenir une valeur moyenne de 20 % pour la dispersion des mesures effectuées lors de cette mission ; nous obtenons d'ordinaire des valeurs comprises entre 10 et 15 % et on peut dire qu'ici la part d'erreur provenant de la complexité structurale est assez grande.

4. Méthode d'interprétation adoptée.

Les courbes révélant dans tous les cas l'existence d'au moins trois terrains, leur interprétation s'est faite presque exclusivement par calcul numérique sur machine, les propositions successives de modèles étant élaborées à l'aide des abaques à deux ou trois terrains et des abaques de croix. Lorsque le nombre des terrains atteint ou dépasse cinq, il n'est pas facile d'aboutir rapidement. Cependant il arrive fréquemment qu'une des propositions approche d'assez près la solution recherchée.

Quand il advient qu'une simple translation permet de faire passer au mieux la courbe théorique par les points expérimentaux, il est judicieux de se reporter à la loi de similitude énoncée au chapitre précédent ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ $K_T = \frac{K_1^2}{K_2}$.

Si une translation selon les abscisses s'avère seule nécessaire, on modifiera uniquement les épaisseurs des terrains en les multipliant tous par le coefficient K_L alors égal à $\sqrt{K_T}$ puisque dans la loi de similitude $K_\rho = 1$. La valeur de ce coefficient sera obtenue en faisant le rapport des abscisses de deux points de même ordonnée de la courbe calculée et de la courbe expérimentale. Par contre, opérer une translation selon les ordonnées est un peu plus complexe. En effet, il faut non seulement multiplier les résistivités par K_ρ mais aussi les épaisseurs par $K_L = \sqrt{K_\rho}$, le coefficient K_T de la loi de similitude restant égal à l'unité. Quant à une translation quelconque, elle pourra être décomposée en une translation selon les abscisses et une translation selon les ordonnées suivant les règles précédentes (fig. 12).

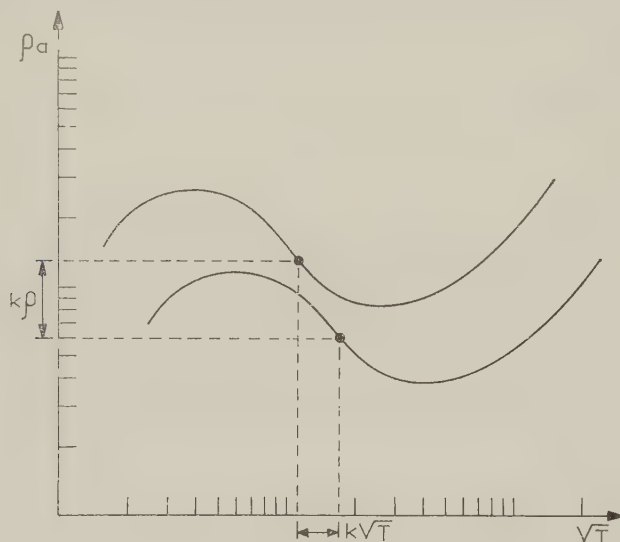


FIG. 12. — Translation des courbes magnéto-telluriques.

Nous verrons que c'est l'intercalation de couches résistantes qui se révèle la plus délicate à traiter. Ces couches ont en effet une « transparence » relative de sorte que leur épaisseur peut être sous-estimée ou au contraire surestimée si le géophysicien n'agit pas avec prudence dès que la courbe de ρ_a semble indiquer la présence d'un terrain résistant.

La plupart des résultats d'interprétation n'ont pas été obtenus par l'étude individuelle de chacune des deux courbes d'un sondage, mais à partir d'un document qui fait la synthèse des renseignements fournis par les deux directions de mesure. C'est la courbe obtenue en prenant la moyenne géométrique des ρ_a lus sur chacune des deux courbes ⁽¹⁾ pour chaque période qui joue ce rôle de courbe caractéristique d'une station. Cette moyenne géométrique possède en effet une propriété intéressante : c'est un invariant, elle est donc pratiquement indépendante de l'orientation du système d'axes des mesures. On peut démontrer cette propriété à partir des deux relations bilinéaires ⁽²⁾ qui existent entre les composantes harmoniques, magnétiques et telluriques orthogonales.

⁽¹⁾ Lorsqu'elles sont peu différentes.

⁽²⁾ $H_x = a E_x + b E_y$

$H_y = c E_x + d E_y$

Les coefficients a et d , nuls pour une structure tabulaire, sont encore petits devant b et c quand il n'en n'est plus ainsi.

La valeur $a \cdot d - b \cdot c$ du déterminant se réduit donc à $b \cdot c$. Le déterminant s'exprime alors par $\sqrt{\frac{1}{\rho_x}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho_y}}$ et $\sqrt{\rho_x \rho_y}$ apparaît bien comme un invariant.

Lorsque les deux courbes du sondage sont par trop différentes, on ne peut plus admettre la simplification précédente, il est alors préférable de ne retenir que la courbe obtenue suivant la direction qui serait longitudinale en assimilant la structure pressentie à une structure cylindrique.

Précisons enfin que nous ne tentons pas, lors des calculs théoriques, d'obtenir un modèle qui procurerait une courbe exactement superposable à une courbe expérimentale primitivement tracée. Nous cherchons de façon un peu différente à produire une courbe théorique qui se glisse au mieux entre les limites $\rho_a + \Delta\rho_a$ et $\rho_a - \Delta\rho_a$ correspondant à la dispersion des mesures. En procédant ainsi on évite, dans une certaine mesure, d'attribuer trop d'importance à des valeurs de ρ_a peu significatives qui risquent d'entraîner une multiplication erronée du nombre des terrains dans la coupe géo-électrique proposée.

5. Résultats de l'interprétation.

1. Cartes de résistivité apparente.

A la différence des cartes de résistivité établies avec les méthodes électriques classiques, celles-ci ne traduisent pas un écorché géologique dans lequel l'épaisseur des terrains intéressés reste sensiblement constante ⁽¹⁾. La profondeur de pénétration est en effet proportionnelle à $\sqrt{\rho}$ de sorte que les courbes d'isorésistivités pour une période donnée ne reproduisent aucunement l'image des isobathes d'un terrain quelconque ou d'une partie de terrain. Leur signification, pour qualitative qu'elle soit, n'en demeure pas moins réelle, l'examen des deux cartes présentées en attestera. On est frappé au premier coup d'œil par leur concordance avec les grands traits de la géologie dont il a été fait mention ci-dessus.

Des deux cartes, celle qui est établie pour $T = 0,04$ s (fig. 13) a évidemment une signification plutôt superficielle ⁽²⁾, on y distingue très bien les zones E.-Centre-S.-O. et l'esquisse d'une zone N.-O., la zone centrale présentant un « golfe » vers le N.-E. La corrélation avec les faciès géologiques de surface est excellente : très fortes valeurs de ρ_a à l'est où le socle est très proche, valeurs moins élevées au S.-O. et au N.-E. correspondant aux reliefs calcaires, et faibles valeurs sur une vaste zone limitée par ces trois pôles résistants, vaste zone s'identifiant très bien à l'extension du faciès marneux déjà décrit.

La seconde carte ($T = 49$ s) intéresse des profondeurs plus importantes ⁽³⁾ (fig. 14), et les indications qu'elle fournit sont dégagées en bonne partie de l'influence des structures superficielles. C'est ainsi que les zones S.-O. et N.-E., qui pouvaient apparaître comme peu profondes au seul examen de la première carte à cause de la forte résistivité des premières couches, manifestent ici l'épaisseur de leur couverture sédimentaire par une diminution des ρ_a vers les grandes périodes. La zone conductrice centrale est marquée par un axe N.-O.-S.-E. présentant un léger étranglement à hauteur de la station 60.

A cette différence près, dont les conséquences structurales restent à établir, la similitude des contours des deux cartes est frappante. On peut en conclure que, dans les grandes lignes, les régions naturelles présentées au début de ce chapitre traduisent bien la géologie structurale de la région.

⁽¹⁾ Il est cependant possible de produire un tel document en M. T. en traçant non pas la courbe $\rho_a = f(\sqrt{T})$ mais $\rho_a = f(P)$ avec P profondeur de pénétration $= \frac{1}{2\pi} \sqrt{10 \rho T}$ (CAGNIARD, 1953).

⁽²⁾ P est d'environ 500 m pour $\rho_a = 20 \Omega \cdot m$ et de 3 km pour $\rho_a = 1000 \Omega \cdot m$.

⁽³⁾ P va de 11 à 160 km lorsque ρ_a passe de 10 à 2000 $\Omega \cdot m$.

10 km

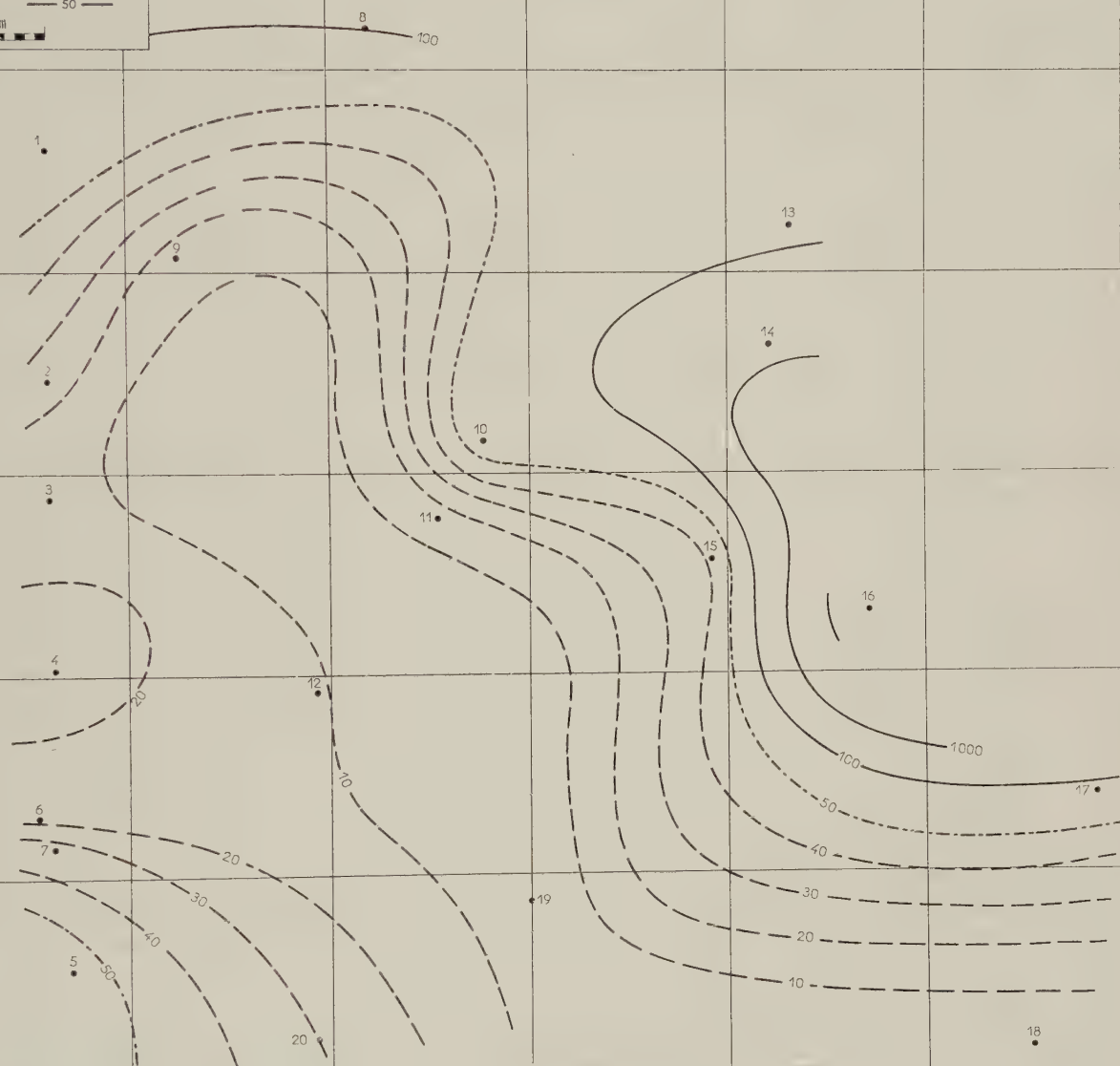


FIG. 13.

MAGNETO-TELLURIQUE

CARTE DES RESISTIVITES APPARENTES EN Ωm

$T = 49 s$

N de la station

Résistivité apparente

• 3

— 50 —

10 km

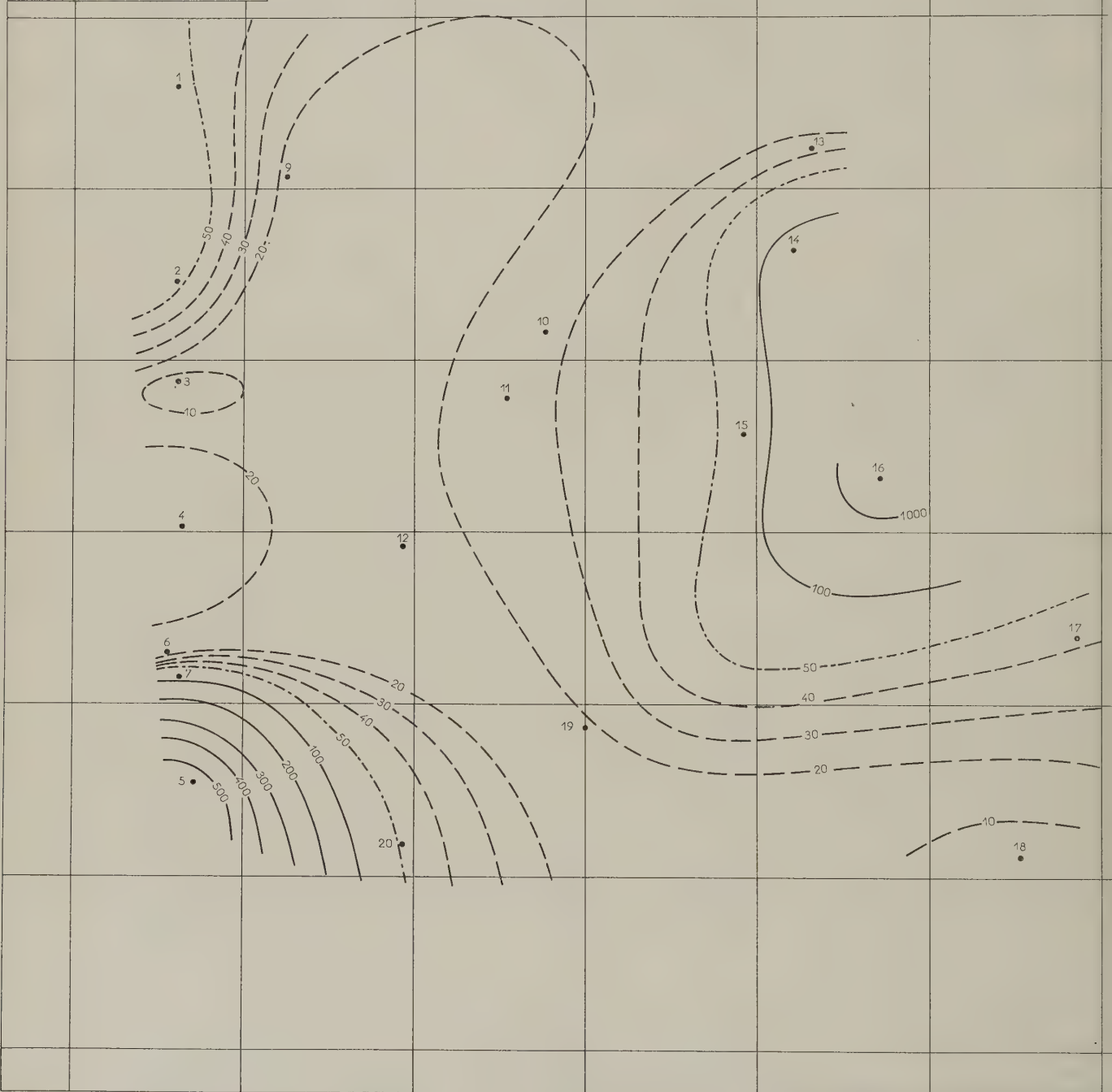


FIG. 14.

2. Discussion des résultats de quelques stations.

La carte de synthèse étant trop explicite pour être présentée ici, on se contentera de discuter le cas de certaines stations et de commenter deux profils établis à partir de cette carte.

L'examen des résultats impose cependant quelques remarques. On constate en effet certaines anomalies dans les coupes géo-électriques de stations par trop voisines de grands accidents géologiques. Anomalies qui se manifestent par la présence de couches résistantes anormalement épaisses et dans certains cas, au contraire, par l'existence inexpiquée de zones conductrices profondes. Il est certain qu'on ne peut proposer actuellement d'explications valables à ces phénomènes, seul un ensemble cohérent de mesures au voisinage de ces zones pourrait susciter autre chose que de vagues hypothèses.

Bien que chaque station constitue en elle-même un cas intéressant, nous allons seulement en retenir quelques-unes pour une analyse plus poussée.

La station 1 est située à l'extrémité ouest de la zone centrale, très près d'un forage pétrolier moyennement profond. La courbe M. T. théorique déduite du log électrique reste incomplète puisque le forage n'a pas atteint le socle. Quant à la courbe expérimentale, si elle permet une investigation plus profonde, elle ne fournit cependant pas la cote du socle. On peut fixer cependant à au moins une dizaine de kilomètres le mur du dernier terrain sédimentaire confirmant ainsi l'hypothèse d'un socle profond à cet endroit.

A l'intérieur de la zone S.-O., la station 5 est très caractéristique de cette région. La courbe montre bien le premier terrain très résistant (près de $3\,000\ \Omega \cdot m$) suivi d'épaisses couches plus conductrices reportant le toit du socle à 10 km. La courbe obtenue d'après un forage voisin révèle une similitude frappante avec la courbe moyenne expérimentale.

Au nord de la zone centrale, la station 10 présente un de ces cas complexes d'intercalation de couches résistantes anormalement épaisses. Sa situation au nord d'une ligne d'affleurement de Trias peut justifier l'hypothèse d'une zone particulièrement « chahutée » susceptible de produire de telles anomalies. En tout état de cause, les documents recueillis ici nous incitent plutôt à penser qu'il s'agit d'une zone profonde du socle contrairement à ce qui était attendu (¹).

Dans la zone haute du socle, à l'est, la station 14 révèle bien l'existence d'un terrain sédimentaire de puissance voisine de 500 m, suivi d'un socle très résistant. La courbe est très simple puisqu'en dehors de ces deux terrains on perçoit seulement l'amorce d'une zone conductrice profonde. L'hypothèse d'un redoublement de série, émise par les géologues de l'E. R. A. P., ne trouve ici aucune confirmation.

Vers le N.-E. on attendait la preuve de l'ensellement, au niveau de la station 13, entre la zone précédente et le socle en affleurement. De fait, les données expérimentales montrent bien l'existence d'une série sédimentaire assez importante puisque le toit du socle s'enfoncerait à quelque 4 km.

Quant à la station 16, la proximité du socle y est telle que les résistivités ne descendent pas en dessous de $1\,000\ \Omega \cdot m$, les inflexions de la courbe correspondent alors à des différenciations du socle en profondeur. La pellicule sédimentaire s'est révélée trop mince pour être accessible à nos fréquences les plus rapides.

3. Les profils.

On présentera ici l'analyse de deux d'entre eux seulement (profil 1 et profil 3), mais ce sont les plus significatifs.

(¹) La profondeur proposée de 13 km peut, néanmoins, être exagérée par l'épaisseur de la couche résistante.

Le profil n° 1 (fig. 15) présente la particularité de comporter une assez forte densité de stations. C'est le résultat des premiers dépouillements qui a montré l'intérêt d'une étude plus serrée dans une zone posant des problèmes structuraux. Il se situe à l'extrémité ouest de la région prospectée et s'étend de la station 5, au sud, à la station 1, au nord.

Les niveaux repérés sont les formations de forte résistivité, généralement de puissantes assises calcaires ou bien le socle. On distingue ainsi trois niveaux sur cette coupe : H_1 qui est un calcaire du Crétacé inférieur, H_2 du Jurassique supérieur et H_3 assimilant le plus souvent Lias inférieur et socle.

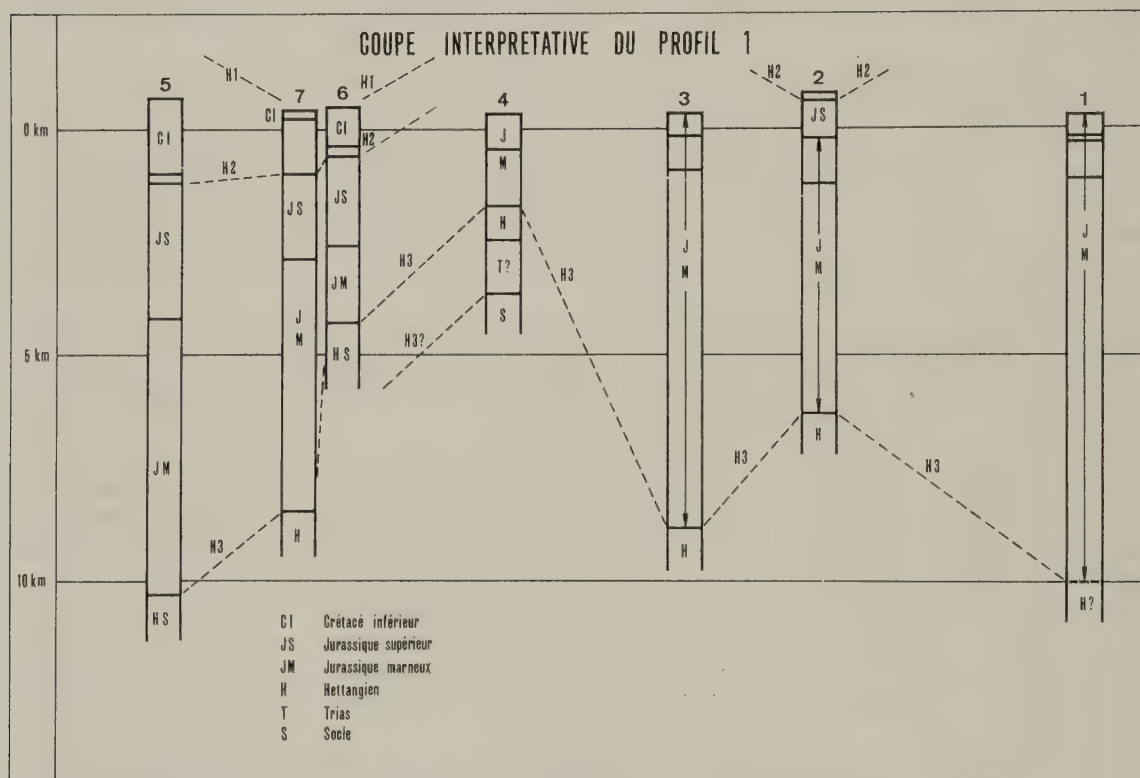


FIG. 15.

L'horizon H_1 n'est visible qu'au sud (stations 5, 6 et 7) et sa puissance décroît rapidement vers le nord. L'horizon H_2 , voisin du précédent, réapparaît quant à lui au nord à la station 2, soulignant ainsi le mouvement anticlinal dont l'axe passerait approximativement par la station 4. On note un étirement très net des couches marneuses vers le sommet de l'anticlinal, conséquence d'une remontée brutale du socle électrique qui se différencie du Lias uniquement à la station 4, ce qui impliquerait la présence d'un Trias conducteur en cette station. Vers le nord, les couches marneuses retrouvent une puissance considérable, si bien qu'à la station 1 leur mur ne se manifeste pas sur la courbe.

Le profil n° 3 (fig. 16) de direction approximative E.-O. n'est pas rectiligne, car on a tenu à le faire passer par un forage pétrolier voisin. La faible densité des stations en dehors du profil précédent explique leur petit nombre sur ce profil. Cette coupe va surtout mettre en évidence la remon-

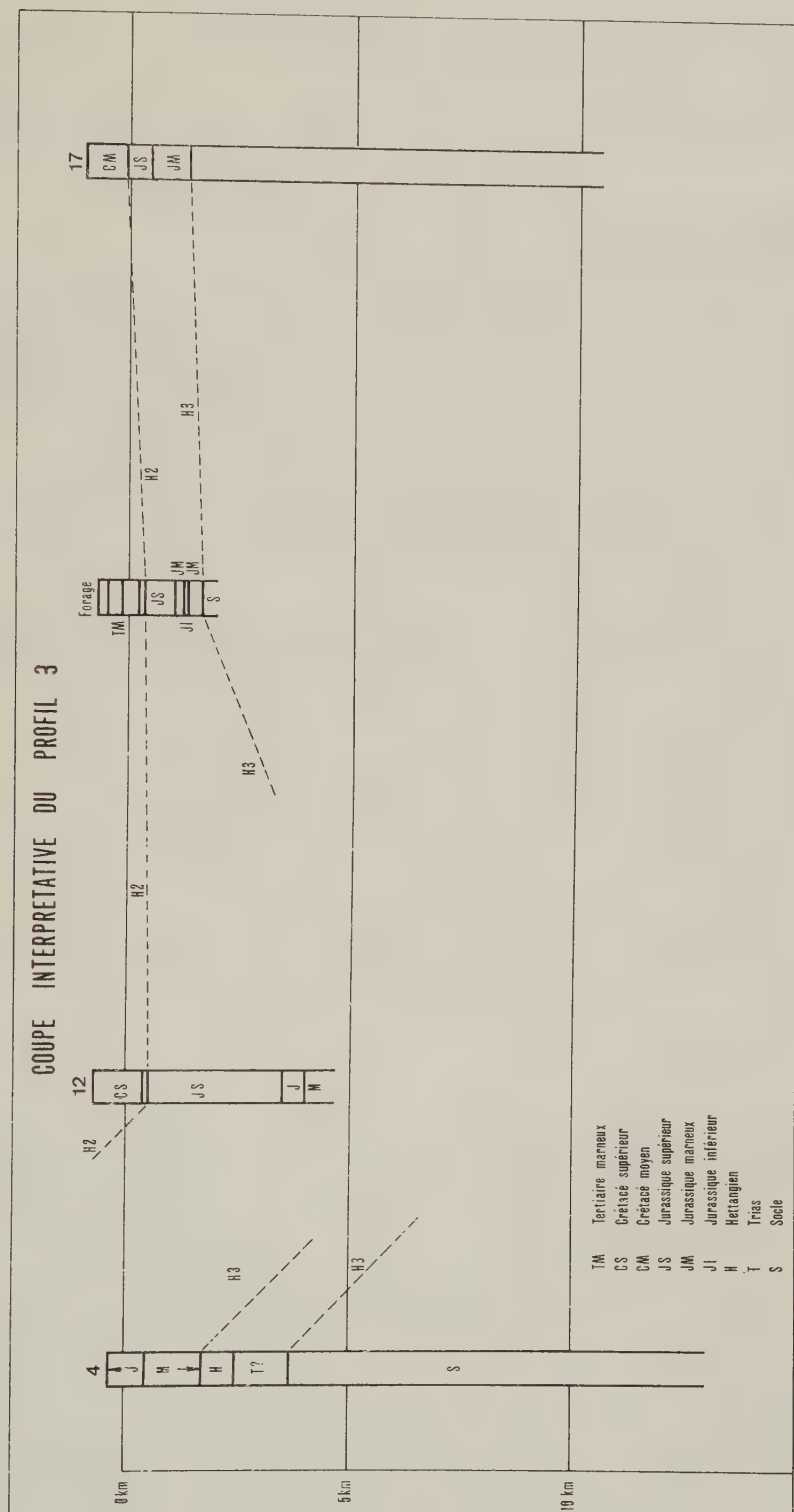


FIG. 16.

tée du socle, puis sa chute en pente douce vers l'est. L'horizon H_1 n'est plus visible. Il y a bien des formations du Crétacé, mais, par passage latéral, elles sont devenues plus proches des marnes. Par contre, le niveau H_2 se suit aisément sauf à la station 17 ; il n'apparaît pas en 12 alors qu'en 4 subsiste la même particularité que précédemment, savoir qu'ici on peut dissocier l'Hettangien du socle.

6. Erreurs possibles sur les résultats.

Il est difficile d'apprécier rigoureusement la marge d'erreur qui doit être affectée aux résultats de l'interprétation. Une étude fondée sur l'imprécision des courbes de sondage due aux écarts moyens sur ρ_a risque de conduire à une surestimation des erreurs. Car il n'est en général pas possible de tracer successivement une courbe passant par toutes les valeurs minimales de ρ_a et une autre passant par les valeurs maximales. La solution qui est retenue ne laisse parfois que peu de latitude pour d'autres tracés, cela n'est cependant pas une preuve de précision.

On doit distinguer dans cette étude le cas des couches résistantes et des couches conductrices. Le chapitre précédent a déjà montré une différence très nette du pouvoir de résolution de la méthode quand on fait cette distinction. Il faut, de plus, introduire l'indétermination provoquée par les possibilités d'équivalence.

Avec les couches résistantes, c'est l'erreur expérimentale qui est responsable de l'imprécision de l'interprétation. Si l'écart moyen est de $\pm 10\%$, l'épaisseur du second terrain pourra par exemple être de 15 ou de 20 fois celle du premier terrain. Par contre, les équivalences n'apporteront de doute que sur la résistivité du terrain résistant à l'exclusion de son épaisseur.

Si la couche intermédiaire est conductrice, dans une situation analogue à la précédente, on n'hésite plus qu'entre 15 et 16,5 pour les valeurs de e_2/e_1 . Mais alors les équivalences ont de plus graves conséquences car elles jouent sur l'identité des rapports e_2/ρ_2 . Même en restant dans des limites raisonnables pour le choix de ρ_2 , il n'est pas rare que e_2 puisse ainsi varier dans de larges limites (1 à 2 par exemple). Les plus graves indéterminations n'interviennent d'ailleurs pas pour les coupes à trois terrains, mais pour celles qui en comprennent davantage.

Cette étude, très sommaire, montre que finalement la détermination de l'épaisseur des terrains est entachée d'une imprécision du même ordre de grandeur dans tous les cas, bien que les causes de cette imprécision n'agissent pas de façon identique en face des différents types de structures.

Conclusion.

Les résultats de cette mission ne répondent certes pas avec précision à toutes les questions qui étaient posées. L'apport de la M. T. n'est cependant pas discutable ; il se situe bien au-dessus d'une simple vérification des grandes lignes structurales, vérification au demeurant effectuée par les seules cartes de résistivité. Les coupes géo-électriques répondent dans la plupart des cas aux problèmes posés ; même si les cotes ne sont pas toujours fournies, on a pu vérifier ou infirmer les hypothèses quant à la profondeur du socle et, partant, à l'épaisseur de certains terrains. Les coupes interprétatives, pour leur part, prouvent bien l'intérêt de la méthode. Il est à remarquer qu'une prospection équivalente à celle-ci, mais en terrain inconnu, paraîtrait beaucoup plus fructueuse, car toutes ses conclusions seraient nouvelles et ne se contenteraient pas, comme ici, de confirmer les connaissances acquises, parfois de longue date, par une multitude d'observations et de mesures.

Les améliorations souhaitables sont multiples. Pour le cas présent, la plus importante, avec possibilité d'application immédiate, serait l'analyse de périodes supérieures à la minute de façon à toujours bien caractériser le socle.

CONCLUSION

La méthode magnéto-tellurique évoluera encore beaucoup avant d'atteindre un développement comparable à celui de la sismique par exemple.

Le système d'acquisition des données subira quelques modifications par suite des progrès de l'électronique, notamment quant au bruit des transistors. L'appareillage pourra être adapté aux divers types de prospection que l'on est susceptible d'entreprendre. On peut ainsi concevoir un matériel important à vocation universelle à côté de petites unités capables de résoudre des problèmes particuliers.

L'évolution la plus importante doit intervenir au niveau du traitement de l'information, qui reste assez rudimentaire à quelques exceptions près (BUREAU, 1968). C'est la digitalisation des données soit dès leur détection, soit par conversion d'enregistrements analogiques sur bande magnétique qui, en se généralisant, permettra une analyse plus poussée des phénomènes (y compris les variations de H_z). A ce stade, l'interprétation des cas complexes sera plus facilement quantitative qu'à l'heure actuelle.

En dernier lieu, il ne faut pas perdre de vue que tout travail se rapportant au sous-sol s'intègre dans le vaste ensemble des Sciences de la Terre. Cela implique une collaboration étroite entre les représentants de plusieurs disciplines. Cette collaboration est indispensable si l'on veut exploiter complètement l'énorme potentiel d'enseignements que sont les observations et les mesures faites sur le terrain ou dans les forages.

Première date de remise du manuscrit :

avril 1969.

Date de remise définitive,

après modifications apportées au manuscrit :

novembre 1969.

BIBLIOGRAPHIE

- MAILLET (R.). — The fundamental equations of electrical prospecting. *Geophysics*, 1947, **12**, p. 529-556.
- CAGNIARD (L.). — Principe de la méthode magnéto-tellurique, nouvelle méthode de prospection géophysique. *Ann. Géophys.*, 1953, **9**, p. 95-125.
- BERDICHEVSKI (M.) et BRUNELLI (B.). — Teoreticheskie predposylki magnito-telluriceskogo profilirovaniya. *Izvest. Akad. Nauk S. S. R.*, 1959, **7**, p. 1061-1069.
- BERDICHEVSKI (M.). — Electrical prospecting with the telluric current method. 1960, traduit par *Keller Colorado School Mines Quart.*, 1965, **60**, **1**, p. 1-216.
- BENDERITTER (Y.). — Étude, mise au point, étalonnage d'appareils mobiles pour la prospection magnéto-tellurique. Thèse doctorat de spécialité (Géophysique appliquée), *Fac. Sci.*, Paris, juin 1963.
- DUPIS (A.). — Description, résultats, enseignements de la première campagne expérimentale de sondages magnéto-tellurique effectués en France. Thèse doctorat de spécialité (Géophysique appliquée), *Fac. Sci.*, Paris, juin 1963.
- TIGER (B.). — Considérations théoriques sur les sondages magnéto-telluriques, leur interprétation et leurs applications. Thèse doctorat de spécialité (Géophysique appliquée), *Fac. Sci.*, Paris, juin 1963.
- MANN (J. E.). — Magnetotelluric theory of the sinusoidal interface *J. Geophysics Res.*, 1964, **69**, **16**, p. 3517-3524.
- BENDERITTER (Y.) et DUPIS (A.). — Technique de mesure de la différence de phase entre champ tellurique et champ magnétique dans la méthode de prospection magnéto-tellurique. *Ann. Géophys.*, 1965, **21**, p. 605-606.
- MANN (J. E.). — The importance of Anisotropic conductivity in magnetotelluric interpretation. *J. Geophysics Res.*, 1965, **70**, **12**, p. 2940-2942.

- PORSTENDORFER (G.). — Methodische und apparative Entwicklung magneto-tellurischer Verfahren mit Anwendung auf die Tiefenerkundung im Bereich der norddeutschen Leitfähigkeitsanomalie. *Dtsche Akad. Wissensch.*, Berlin, 1965, 76 p.
- ORELLANA (E.) et MOONEY (H.). — Master tables and cuves for vertical electrical sounding over layered structures. *Inter-ciencia*, Madrid, 1966.
- CAGNIARD (L.). — Théorie et pratique de la prospection magnéto-tellurique. *Pétrole Inform.*, 1967, **435**, p. 121-129.
- O'BRIEN (D. P.) et MORRISON (H. F.). — Electromagnetic fields in an N-loyer anisotropic half-space. *Geophysics*, 1967, **32-4**, p. 668-677.
- BENDERITTER (Y.). — Appareillage magnéto-tellurique de prospection pétrolière. *Rev. Inst. Franç. du Pétrole*, 1968, **XXIII-5**, p. 608-618.
- BENDERITTER (Y.), DUPIS (A.) et MORAT (P.). — Traitement des informations magnéto-telluriques à l'aide d'intégrateurs synchronisés. *L'Onde électr.*, 1968, **491**, p. 177-178.
- BUREAU (J. L.). — Sur une méthode de dépouillement magnéto-tellurique. *C. R. Acad. Sci.*, 1968, **266**, p. 1173-1174.
- WU (F. T.). — The inverse problem of magneto-telluric analysis for a multilayered earth. *Geophysics*, 1969, **34-1**, p. 75-86.
- NABETANI (S.) et RANKIN (D.). — An inverse method of magnetotelluric analysis for a multilayered earth. *Geophysics*, 1969, **34-1**, p. 75-86.
- RANKIN (D.) et REDDY (I. K.). — A magnetotelluric study of resistivity anisotropy. *Geophysics*, 1969, **34-3**, p. 438-449.

